

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ІМ. Є.О.ПАТОНА НАЦІОНАЛЬНОЇ  
АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Штофель Ольга Олександрівна**

УДК 620.193:621.791

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**Вдосконалення методу фрактального аналізу для оцінки взаємозв'язку  
структури і властивостей конструкційних сталей**

05.16.01 - металознавство та термічна обробка металів

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело  
О.О. Штофель

Науковий керівник Рабкіна Мар'яна Данилівна, доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник

Київ – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Штофель О.О.* Вдосконалення методу фрактального аналізу для оцінки взаємозв'язку структури і властивостей конструкційних сталей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.01 - «Металознавство та термічна обробка металів». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Міністерство освіти і науки України, Київ, 2021.

Фрактальний аналіз в матеріалознавстві – це математичний алгоритм виявлення єдиного числового елемента для опису багаторівневих структур, якими, зокрема, є структура металів, поверхні зламів, зони руйнування, структурні межі в'язко-крихкого переходу, тощо.

Контент дисертаційної роботи був напрацьований в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України під час навчання в аспірантурі протягом 2014-2018 р.р. Він також увійшов до складу наукових досліджень в рамках відомчого замовлення «Розробка методів оцінки конструкційної міцності зварних трубопроводів та посудин тиску атомної енергетики та нафтохімії».

У зв'язку із тривалим терміном експлуатації ряду діючих конструкцій в означених галузях, нагальною залишається проблема вибору оптимального способу оцінки технічного стану щодо прогнозування їх залишкового ресурсу. Для рішення цієї проблеми призначена така дисципліна як технічна діагностика, яка має різноманіття підходів, надійність яких, в значній мірі, залежить від структури і механічних властивостей застосованих матеріалів, які в свою чергу залежать, перш за все від способу їх отримання та умов експлуатації. Як відомо, більшість з методів та засобів технічної діагностики, має досить трудомісткий характер. Тому пошук сучасних методів контролю, які не потребують значних витрат, є досить актуальною задачею. Зважаючи на це, в роботі наведено дані стосовно існуючих підходів щодо оцінки впливу

структурного стану матеріалу, в тому числі анізотропії прокату, на тривалість його безпечної експлуатації і – обґрунтування вибору фрактального методу, як сучасного, доступного, коректного та недорогого способу визначення необхідних параметрів. Сформульовано сутність цього підходу, яка полягає в обробці масштабуванням фрактальної структури і описів розподілу будь-якої структурної характеристики при даному масштабуванні. Постулюється, що фрактальна геометрія описує структуру більш ретельно, ніж стандартна металографія, але за умовою, що дана структура є фрактальною.

Таким чином, метою дослідження є виявлення і обґрунтування кореляційних зв'язків між фрактальними параметрами структури  $D$  і фізико-механічними характеристиками ряду низьколегованих конструкційних сталей, зокрема границями плинності та міцності, руйнівним тиском, ударною в'язкістю, коерцитивною силою, тощо. Обґрунтовано вибір типу сталі із феритно-перлітною структурою, до якої належать досліджені матеріали, а саме: сталь Дс для кисневих балона, сталь 20К для посудин тиску, та високоміцна сталь для арматурних канатів. На натурних зразках, а також зразках, зруйнованих після механічних випробувань, підраховується фрактальна розмірність і здійснюється пошук взаємозв'язків механічних характеристик і фрактальних розмірностей з метою прогнозування експлуатаційних характеристик за допомогою фрактальних множин.

Отже не проводячи високовартісних спеціальних випробувань, а лише використовуючи фрактальний підхід, виникає реальна можливість визначити і спрогнозувати експлуатаційні характеристики матеріалів, зокрема в діючих конструкціях. У зв'язку з цим розроблено алгоритм та створено програмний супровід для оцінки структурно-текстурного стану матеріалу, заснованого на його фрактальних характеристиках та співставлено результати дослідження фрагментів металевих конструкцій за запропонованою методикою під час експериментальних випробувань з результатами раніше відомих методів діагностики металу.

Стосовно структурно-текстурного стану матеріалу, в результаті визначення металографічних і кристалографічних особливостей металу, водночас підтверджена залежність коерцитивної сили  $H_c$  від структурно-текстурних параметрів сталі. Показано, що фазові перетворення, які призводять до зростання зерна, а також посилення «крихкої» текстурної компоненти  $\{001\} \langle 110 \rangle$  супроводжуються зростанням коерцитивної сили за рахунок збільшення кількості кристалів, що намагнічуються в напрямку важкого намагнічування  $\langle 110 \rangle$ .

Отримано експериментальні результати щодо взаємно однозначної відповідності між кількісними характеристиками досліджуваного металу і фрактальною розмірністю його мікроструктури. Так, для оцінки експлуатаційних пошкоджень в сталевих конструкціях, зокрема в армокантах АЕС було застосовано підхід мультифрактальної параметризації, головним досягненням якого було підтвердження існування взаємно однозначної відповідності між фрактальною розмірністю мікроструктури металу та його кількісними характеристиками. За допомогою розробленого підходу встановлено основні причини передчасних відмов типових арматурних канатів захисних оболонок АЕС, виходячи з якості дротів, характеру їх пошкоджених поверхонь, фрактальних особливостей зламу. При цьому виявлено залежність фрактальної розмірності від середніх значень механічних характеристик міцності (границь міцності  $\sigma_B$  і плинності  $\sigma_{0.2}$ ).

Для встановлення відповідності механічних властивостей низьколегованих і вуглецевих сталей вимогам нормативної документації, розроблено програмний супровід, що дозволяє оперативну оцінку мультифрактальних параметрів цифрових зображень поверхонь руйнування. Так, на основі методу фрактального аналізу встановлено можливість обчислення кількісних критеріїв структурної неоднорідності зламу. Виявлено сталий взаємозв'язок між характером руйнування експлуатаційних зламів і фрактальною розмірністю: більш крихкому характеру руйнування відповідає менша величина фрактальної розмірності при меншій пошкодженості матеріалу.

Вперше встановлені кореляційні залежності, які обґрунтовано пов'язують фізико-механічні характеристики низьколегованих сталей з фрактальною розмірністю структури, що забезпечує можливість експертної оцінки властивостей матеріалу.

Так, в результаті проведених розрахунків методом кінцевих елементів встановлено критичні значення тиску передруйнування в досліджуваних балонах із сталі Дс. Встановлено кореляційні залежності, які обґрунтовано пов'язують фізико-механічні характеристики феритно-перлітних сталей і фрактальну розмірність структури, що забезпечує можливість експертної оцінки властивостей матеріалу. При цьому досліджено вплив анізотропії матеріалу та умов експлуатації на закономірності руйнування із застосуванням розробленої методики.

Вперше розроблено програмний супровід для підрахунку фрактальної розмірності фотографій зламів, тріщин і т.і., що дозволяє провести оперативну оцінку фрактальних параметрів цифрових зображень пошкоджень для встановлення відповідності технічного стану конструкції нормативним вимогам. За допомогою створеної програми проведено більшість досліджень поверхонь, як мікрошліфів, так і мікрозламів зразків після випробувань, з метою визначення залежностей між фрактальними величинами і механічними властивостями матеріалів.

При підготовці балонів до гідравлічних випробувань проведені вимірювання вперше дозволили дізнатися, що являє собою внутрішня поверхня балонів і визначити потенційно небезпечні ділянки циліндричної стінки при тому, що допустима товщина стінки за ДСТУ, повинна бути не менше 6,8 мм. Ці відомості представляють надзвичайний інтерес не тільки в окремому випадку, але й під час експлуатації балонів – при вирішенні питання продовження або припинення терміну служби.

Таким чином, подальший розвиток метод мультифрактального аналізу набув у зв'язку із запобіганням можливості поширення тріщин в елементах

діючих конструкцій внаслідок тривалого впливу корозійних середовищ та значних експлуатаційних напружень.

Підготовка дисертаційного матеріалу здійснювалася в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України під час навчання в аспірантурі 2014-2018 н.р.

### **ЗМІСТ 163 сторінки**

*Ключові слова:* фрактал, фрактальний аналіз, фрактальна розмірність, мікроструктура, структуроутворення, фрактографія поверхні руйнування, методи дослідження, діагностика матеріалу.

**1.** Штофель О.А., Рабкина М.Д. Использование мультифрактального анализа для оценки свойств конструкционных сталей. *Universum: Технические науки: электрон. Научн. Журн.* 2016. – №10(31) ISSN:2311-5122 (eLIBRARY.RU, EBSCO Discovery, GoogleScholar)

**2.** Torop, V.M., Rabkina, M.D., Shtofel', O.O. *et al.* On the Causes of Fractures of Reinforcing Ropes of the Protective Shells of Power-Generating Units of Nuclear Power Plants. *Mater Sci* **54**, 240–249 (2018).

**3.** Штофель О.О. Застосування методу фрактального аналізу до вивчення структури металу. Науково технічний журнал МЕТАЛОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МЕТАЛІВ, 2019 - Tom 91, No. 3, сс. 40-46.

**4.** Olga Shtopfel, Marjana Rabkina ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДО ВИВЧЕННЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ. Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування 58 (2), 2019 – с.28-33. (Index Copernicus, Google Scholar, BASE, WorldCat, OpenAIRE, наукометричної бази даних "РІНЦ") ISSN: 2663-3450

**5.** Shtofel O, Chijskaya T., Kulieznova S., Metallographic studies of vessel steel samples: ДС, 35Г / 40Г and steel 20 by fractal analysis. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)* ISSN: 2458-925X Vol. 6 Issue 2, February – 2020

**6.** Штофель О.А., Рабкина М.Д. Фрактальная природа трещин при анизотропии. – Київ VIII МКМУ «Зварювання та споріднені технології», 2015. – 318.

**7.** Штофель О. А. Метод фрактального анализа для оценки структуры конструкционных сталей. – Харьков: XVI МНПК: «Развитие науки в XXI веке», 2016. – 120-122.

**8.** Рабкіна М.Д., Штофель О.О. Фрактальна природа тріщин при руйнуванні зварних з'єднань. – Київ: МК «Зварювання та споріднені технології - сьогодення і майбутнє», 2018 – с.77-78

**9.** Вовк Я. С., Ляхман А. В., Штофель О. О. Метод фрактального аналізу як сучасний підхід до вивчення структури металу, Розвиток сучасної науки: теорія, практика, інновації: XV Міжнародна науково-практична інтернет-конференція: тези доповідей, Дніпро, 29 березня 2019 р. – Ч. 1. – Дніпро: ГО «НОК», 2019 – с. 5-13.

**10.** Вовк Я. С., Штофель О. О. Метод фрактального аналізу: історія та розвиток. – Київ: XVII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція – Історія розвитку науки, техніки та освіти, 2019 – с. 71.

**11.** Вовк Я. С., Штофель О. О. Метод фрактального аналізу як сучасний підхід до вивчення фізики, Сучасні проблеми математики та її застосування в природничих науках та інформаційних технологіях: Збірка матеріалів XIV міжнародної наукової конференції для молодих вчених/ Під ред. проф. Жолткевича Г.М. – Х: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2019 – с. 31.

**12.** Ляхман А.В., Штофель О.О. Історія виникнення методу фрактального аналізу, XXIV Всеукраїнська наукова конференція молодих істориків науки, техніки і освіти та спеціалістів за темою: «Наука, як феномен національної культури»: Мат.конф., 19 квітня 2019 р., м.Київ. – К., 2019. - с.134-136

**13.** Штофель О. О., Чижська Т. Г. Підготовка металевого зразка до вивчення його мікроструктури методом фрактального аналізу. - Інноваційні вектори розвитку сучасних наукових досліджень: XXI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція: тези доповідей, Харків, 11 жовтня 2019 р. – Ч. 1. – Дніпро: ГО «НОК», 2019 – с. 48-54

## SUMMARY

*Shtofel O.O.* Improvement of the fractal analysis method to evaluate the relationship between the structure and properties of structural steels. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.16.01 - "Metal science and thermal processing of metals". - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

Fractal analysis in materials science is a mathematical algorithm for detecting a single numerical element to describe multilevel structures, which, in particular, are the structure of metals, fracture surfaces, fracture zones, structural boundaries of the viscous-brittle transition, and so on.

The content of the dissertation was developed at the Institute of Electric Welding. E.O. Paton of the National Academy of Sciences of Ukraine during postgraduate studies during 2014-2018 It was also included in the research within the departmental order "Development of methods for assessing the structural strength of welded pipelines and pressure vessels of nuclear energy and petrochemistry."

Due to the long service life of a number of existing structures in these industries, the problem of choosing the optimal method of assessing the technical condition for forecasting their residual life remains urgent. To solve this problem, such a discipline as technical diagnostics is designed, which has a variety of approaches, the reliability of which largely depends on the structure and mechanical properties of the materials used, which in turn depend primarily on the method of production and operating conditions. As you know, most of the methods and tools of technical diagnostics are quite time consuming. Therefore, the search for modern control methods that do not require significant costs is a very important task. In view of this, the paper presents data on existing approaches to assess the impact of structural condition of the material, including rolled anisotropy, the duration of its safe operation and - justification for choosing the fractal method as a modern, affordable, correct and inexpensive way to determine the necessary parameters. The



essence of this approach is formulated, which consists in processing by scaling of fractal structure and descriptions of distribution of any structural characteristic at the given scaling. It is postulated that fractal geometry describes the structure more carefully than standard metallography, but on the condition that this structure is fractal.

Thus, the aim of the study is to identify and substantiate correlations between fractal parameters of structure D and physical and mechanical characteristics of a number of low-alloy structural steels, including yield strength, destructive pressure, toughness, coercive force, etc. The choice of the type of steel with ferrite-pearlitic structure, to which the investigated materials belong, is substantiated, namely: steel Ds for oxygen cylinders, steel 20K for pressure vessels, and high-strength steel for reinforcing ropes. Full-scale samples, as well as samples destroyed after mechanical tests, calculate the fractal dimension and search for the relationship between mechanical characteristics and fractal dimensions in order to predict performance using fractal sets.

Therefore, without conducting high-value special tests, but only using a fractal approach, there is a real opportunity to determine and predict the performance of materials, in particular in existing structures. In this regard, an algorithm was developed and software was created to assess the structural and textural state of the material based on its fractal characteristics and compared the results of the study of fragments of metal structures by the proposed method during experimental tests with the results of previously known methods of metal diagnostics.

Regarding the structural and textural state of the material, as a result of determining the metallographic and crystallographic features of the metal, the dependence of the coercive force  $H_c$  on the structural and textural parameters of steel is confirmed at the same time. It is shown that the phase transformations that lead to grain growth, as well as the strengthening of the "fragile" texture component  $\{001\} \langle 110 \rangle$  are accompanied by an increase in coercive force due to an increase in the number of magnetized crystals in the direction of heavy magnetization  $\langle 110 \rangle$ .

Experimental results on the mutually unambiguous correspondence between the quantitative characteristics of the studied metal and the fractal dimension of its microstructure were obtained. Thus, the multifractal parameterization approach was used to assess operational damage in steel structures, in particular in NPP reinforcement, the main achievement of which was the confirmation of the existence of a mutually unambiguous correspondence between the fractal dimension of the metal microstructure and its quantitative characteristics. With the help of the developed approach the main reasons of premature failures of typical reinforcing ropes of NPP protective shells are established, proceeding from quality of wires, character of their damaged surfaces, fractal features of fracture. The dependence of the fractal dimension on the average values of the mechanical characteristics of strength (yield's strength  $\sigma_B$  and yield strength  $\sigma_{02}$ ) was revealed.

To establish compliance of mechanical properties of low-alloy and carbon steels with the requirements of regulatory documentation, software support has been developed that allows prompt evaluation of multifractal parameters of digital images of fracture surfaces. Thus, based on the method of fractal analysis, the possibility of calculating quantitative criteria for structural inhomogeneity of fracture has been established. There is a stable relationship between the nature of the fracture of operational fractures and the fractal dimension: the more fragile nature of the destruction corresponds to a smaller value of the fractal dimension with less damage to the material.

For the first time, correlation dependences have been established, which reasonably link the physical and mechanical characteristics of low-alloy steels with the fractal dimension of the structure, which provides the possibility of expert evaluation of the material properties.

Thus, as a result of finite element calculations, the critical values of the pre-fracture pressure in the investigated cylinders made of steel Ds were established. Correlation dependences have been established, which reasonably link the physical and mechanical characteristics of ferritic-pearlitic steels and the fractal dimension of the structure, which provides the possibility of expert assessment of the properties of

the material. The influence of material anisotropy and operating conditions on the patterns of destruction using the developed method is investigated.

For the first time, software was developed to calculate the fractal dimension of photographs of fractures, cracks, etc., which allows to quickly assess the fractal parameters of digital images of damage to establish compliance with the technical condition of the structure to regulatory requirements. With the help of the created program the majority of researches of surfaces, both microsections, and microfractures of samples after examinations, for the purpose of definition of dependences between fractal sizes and mechanical properties of materials are carried out.

When preparing the cylinders for hydraulic tests, the measurements for the first time allowed to find out what is the inner surface of the cylinders and to identify potentially dangerous areas of the cylindrical wall, although the allowable wall thickness according to DSTU must be at least 6.8 mm. This information is of great interest not only in a particular case, but also during the operation of the cylinders - when deciding whether to extend or terminate the service life.

Thus, the method of multifractal analysis was further developed in connection with the prevention of the possibility of crack propagation in the elements of existing structures due to prolonged exposure to corrosive environments and significant operating stresses.

Preparation of the dissertation material was carried out at the Institute of Electric Welding. E.O. Paton of the National Academy of Sciences of Ukraine during studying in postgraduate studies 2014-2018.

## **CONTENTS 163 pages**

*Key words:* fractal, multifractal, fractal analysis, fractal dimension, microstructure, structure formation, fractography of surface of destruction, research methods, material diagnostics.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....</b>	<b>15</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>16</b>
<b>ОБСЯГ І СТРУКТУРА ДИСЕРТАЦІЇ. ДИСЕРТАЦІЙНА РОБОТА ВИКЛАДЕНА НА 163 СТОРІНКАХ МАШИНОПИСНОГО ТЕКСТУ, СКЛАДАЄТЬСЯ ЗІ ВСТУПУ, 4 РОЗДІЛІВ, ЗАГАЛЬНИХ ВИСНОВКІВ, СПИСКУ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА 1 ДОДАТКУ. ОБСЯГ ОСНОВНОГО ТЕКСТУ ДИСЕРТАЦІЇ СКЛАДАЄ 115 СТОРІНОК ДРУКОВАНОГО ТЕКСТУ. РОБОТА ІЛЮСТРОВАНА 25 ТАБЛИЦЯМИ ТА 63 РИСУНКАМИ. СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ МІСТИТЬ 125 НАЙМЕНУВАНЬ, З НИХ 80 КИРИЛИЦЕЮ ТА 45 ЛАТИНИЦЕЮ .....</b>	<b>22</b>
<b>РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ РОЛІ ФРАКТАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ В ПІДВИЩЕННІ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІАГНОСТИКИ МАТЕРІАЛУ .....</b>	<b>23</b>
<b>1.1 Систематизація структури металу за геометричною будовою. Співставлення структурних параметрів, встановлених методами традиційної та фрактальної металографії .....</b>	<b>24</b>
<b>1.2 Основні методи кількісної металографії .....</b>	<b>26</b>
1.2.1 Аналіз по площах .....	27
1.2.2 Визначення середнього розміру зерен .....	27
1.2.3 Точковий метод .....	28
1.2.4 Лінійний аналіз .....	30
1.2.5 Використання лінійного аналізу для матричної структури .....	31
1.2.6 Аналіз багатофазно-поліедричної структури .....	32
1.2.7 Аналіз орієнтованої структури .....	33
<b>1.3 Поняття фрактала і фрактальної розмірності. Співставлення розмірів зерен з фрактальною розмірністю меж зерен .....</b>	<b>33</b>
<b>1.4 Застосування фрактального підходу до оцінки структури і експлуатаційних властивостей конструкційних сталей .....</b>	<b>38</b>
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 .....</b>	<b>44</b>

<b>РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ’ЄКТІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ .....</b>	<b>46</b>
<b>2.1 Основні об’єкти дослідження.....</b>	<b>46</b>
<b>2.2 Відомості про методи дослідження .....</b>	<b>47</b>
2.2.1 Застосування неруйнівних методів контролю, зокрема визначення коерцитивної сили.....	47
2.2.2 Механічні випробування зразків металу .....	53
2.2.3 Визначення хімічного складу металу .....	58
2.2.4 Металографічні дослідження мікроструктури.....	58
2.2.5 Фрактографічні дослідження поверхні зламів.....	58
2.2.6 Кристалографічні дослідження текстури .....	59
<b>2.3 Розробка алгоритму для оцінки структурно-текстурного стану матеріалу, заснованого на його фрактальних характеристиках.....</b>	<b>63</b>
2.3.1 Процедура визначення фрактальної розмірності. Статистична обробка результатів вимірювань – оцінка похибок .....	67
2.3.2 Вдосконалення методики фрактальних досліджень поверхні руйнування. Реконструкція тривимірної картини зламу, отриманої в скануючому електронному мікроскопі .....	69
2.3.3 Розробка програмного супроводу для застосування фрактального методу щодо оцінки структурних параметрів матеріалу .....	72
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2 .....</b>	<b>73</b>
<b>РОЗДІЛ 3 ВПЛИВ СТРУКТУРНИХ І МАГНІТНИХ ЧИННИКІВ НА ФРАКТАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХОНЬ РУЙНУВАННЯ.....</b>	<b>74</b>
<b>3.1 Дослідження структурної неоднорідності в металі оболонок посудин тиску.....</b>	<b>75</b>
3.1.1 Аналіз стану внутрішньої поверхні трубчастих конструкцій при визначенні товщини стінки .....	78
3.1.2 Аналіз НДС металу при вимірюванні коерцитивної сили.....	81
3.1.4 Дослідження металографічної структури металу балонів.....	93

<b>3.2 Аналіз взаємозв'язку коерцитивної сили і текстурних параметрів металу .....</b>	<b>95</b>
3.2.1 Оцінка кристалографічної текстури металу балонів.....	95
3.2.2 Вплив кристалографічної текстури на анізотропію коерцитивної сили.	97
<b>3.3 Механічні властивості металу у зв'язку з фрактальними особливостями структури листових і трубчастих елементів.....</b>	<b>102</b>
3.3.1 Співставлення фрактальних параметрів з відповідними параметрами поверхні зламів.....	103
3.3.2 Експериментальні дослідження ударної в'язкості у зв'язку з анізотропією прокату.....	109
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3 .....</b>	<b>115</b>
<b>РОЗДІЛ 4 ЗАСТОСУВАННЯ ПІДХОДІВ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОЇ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ .....</b>	<b>117</b>
<b>4.1 Металографічні дослідження зразків арматурних канатів захисних оболонок атомних енергоблоків.....</b>	<b>118</b>
4.1.1 Аналіз результатів хімічного складу і мікроструктури металу дротів армоканатів (АК).....	120
<b>4.2 Металографічні дослідження зразків балонної сталі: ДС, 35Г / 40Г і сталі 20 методом фрактального аналізу. ....</b>	<b>128</b>
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4 .....</b>	<b>136</b>
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>138</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>140</b>
<b>ДОДАТОК 1.....</b>	<b>158</b>

### ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

D		Фрактальна розмірність
ОПФ	—	Обернені полюсні фігури
МКК	—	Міжкристалітна корозія
МСЕ	—	Метод скінченних елементів;
НД	—	Нормативна документація
НДС	—	Напружено-деформований стан;
НК	—	Неруйнівний контроль
НС	—	Коерцитивна сила
ОЦК	—	Об'ємно центрована кубічна

## ВСТУП

### Актуальність теми.

Проблема вибору оптимального способу оцінки технічного стану конструкції щодо прогнозування її залишкового ресурсу залишається актуальною. При цьому, для вилучення інформації про експлуатаційні характеристики конструкції, включаючи фізико-механічні властивості матеріалу, насамперед відомості про дефекти, застосовують різні методи діагностики. Більшість цих методів досить трудомісткі, тривалі і дорогі. Проблема оцінки цих властивостей вирішується протягом значного періоду часу методами і засобами фізики твердого тіла, механіки, хімії, матеріалознавства та інших наукових дисциплін. Крім того, зіставлення результатів дослідження металу, отриманих за допомогою неруйнівних методів контролю конструкцій, таких як візуально-оптичний, ультразвуковий, акустичний і т.і., та традиційних механічних випробувань спільно з фізико-хімічними методами аналізу зразків, таких як оптичний, електронний, рентгенівський, тощо, свідчать про те, що жоден з них не може бути універсальним.

Удосконалення методів діагностики призводить до моделювання складних систем, в яких використовуються інформаційні властивості фрактальних моделей.

Слово фрактал (*fractus*) означає, що складається з фрагментів. Започаткування фрактальної геометрії пов'язано із виходом в 1977 році книги Бенуа Мандельброта «*Fractals: Form, chance, and dimension*».

Вже до кінця 20-го століття в багатьох галузях світової науки, незалежно від предмету дослідження, типу даних і їх обробки, накопичилися численні кореляційні закономірності, які в більшості можна пояснити на основі фрактальних моделей процесів і явищ, оскільки переважна більшість об'єктів в природі не можуть бути описані із застосуванням гладких кривих і гладких поверхонь, властивих звичним геометричним фігурам.



*Таким чином, не проводячи високовартісних спеціальних випробувань, а лише використовуючи фрактальний підхід, виникає реальна можливість визначити і спрогнозувати експлуатаційні характеристики матеріалів, зокрема в діючих конструкціях.*

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота є фрагментом наукових досліджень, які проводились в ІЕЗ ім. Є.О. Патона продовж 2014-2018 р.р. А саме відомчого замовлення 1.6.2.12.2 «Розробка методів оцінки конструкційної міцності зварних трубопроводів та посудин тиску атомної енергетики та нафтохімії»

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є виявлення і обґрунтування кореляційних зв'язків фрактальних розмірностей структурних параметрів  $D$  і фізико-механічних характеристик (балу зерна за ГОСТами 5639-82 та 8233-56, товщини зразка, коерцитивної сили, руйнівного тиску, фактичного запасу міцності, ударної в'язкості, границь плинності та міцності, анізотропії, пластичності, пошкодження) матеріалу із конструкційної вуглецевої якісної сталі із вмістом вуглецю 0.16 - 0.24 % (фрагментів обичайки колони  $\varnothing 2200 \times 12$  мм із сталі 20К) та 0.43 - 0.51 % (фрагментів кисневих балонів ємністю 40 л із Сталі Дс після різного терміну експлуатації), а також конструкційної ресорно-пружинної сталі із вмістом вуглецю 0.82 - 0.9 % (фрагментів арматурних канатів із Сталі 85 після передчасного руйнування).

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати наукові першоджерела для виявлення підходів до оцінки впливу структурного стану матеріалу на тривалість його безпечної експлуатації і обґрунтування вибору фрактального методу;
2. Розробити алгоритм та створити програмний супровід для оцінки структурно-текстурного стану матеріалу, заснованого на його фрактальних характеристиках;
3. Порівняти результати дослідження фрагментів металевих конструкцій за запропонованою методикою під час експериментальних випробувань з результатами раніше відомих методів діагностики металу;

4. Дослідити вплив умов експлуатації і анізотропії матеріалу на закономірності руйнування із застосуванням розробленої методики.

*Об'єкт дослідження* – поверхня руйнування фрагментів обладнання після різних термінів експлуатації конструкцій, в т.ч. балони середнього об'єму, на робочий тиск 14,7 МПа, з великим терміном експлуатації.

*Предмет дослідження* – виявлення взаємозв'язку фізико-механічних характеристик з структурно-текстурними особливостями, зокрема з фрактальною розмірністю  $D$ , ряду конструкційних сталей феритно-перлітного класу.

#### **Методи дослідження.**

*Неруйнівний контроль* – це дослідження, які дозволяють зберегти експлуатаційну придатність даного об'єкту без порушення його несучої здатності, що найбільш прийнятно при обстеженні об'єктів, які знаходяться в експлуатації. Він побудований на непрямому визначенні властивостей і характеристик матеріалів.

*Короточасні випробування* циліндричних і плоских зразків на одновісний розтяг були виконані при кімнатній температурі на установці Instron 8802 згідно ГОСТ 1497-84. Швидкість переміщення рухомого захвату машини 10,0 мм/хв.

*Випробування на ударний вигин* проведено згідно зі стандартом ISO 14556-2000 на вертикальному інструментальному копрі, спроектованому і виготовленому в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України.

*Хімічний аналіз* для визначення елементного складу металу досліджуваних фрагментів обладнання здійснено на рентген-флуоресцентному спектрометрі CEP-01 «Elvax Light» і аналізаторі вуглецю ГОУ-1.

*Металграфічні дослідження* мікроструктури шліфів здійснено на мікроскопі NEOPHOT-32зі застосуванням цифрової фотокамери OLYMPUS.

*Фрактографічні дослідження* поверхні експлуатаційних зламів і зламів після випробувань на розтяг і ударну в'язкість здійснено за допомогою

растрового електронного мікроскопа JSM-840 а також – стереоскопічного оптичного мікроскопа МБС-10 зі спеціальною насадкою.

Дослідження *кристалографічної текстури* з побудовою обернених полюсних фігур (ОПФ) проведено на дифрактометрі ДРОН-3, де за методом Бреґга–Брентано зразки і еталон піддавали скануванню, зіставляючи інтегральні інтенсивності їх дифракційних ліній.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше встановлено кореляційні залежності, які пов'язують фізико-механічні характеристики ферито-перлітних сталей із фрактальними розмінностями. Використання методу фрактального аналізу дає можливість визначити і спрогнозувати експлуатаційні характеристики матеріалів безпосередньо в реальних конструкціях без проведення спеціальних випробувань з високою вартістю.

Показано, що існує залежність фрактальної розмірності із товщиною стінки. Показано, що структурні і магнітні властивості впливають на фрактальну розмірність. Встановлено кореляційні залежності середньої фрактальної розмірності меж зерен з ударною в'язкістю KCV при  $-10^{\circ}\text{C}$  і  $20^{\circ}\text{C}$ , руйнівним тиском, а також границями плинності  $\sigma_{0,2}$  і міцності  $\sigma_B$ .

2. Вперше встановлено, що з використанням методу фрактального аналізу існує можливість запобігти поширенню тріщин в елементах діючих конструкцій внаслідок тривалого впливу корозійних середовищ та значних експлуатаційних навантажень.

Дослідженню ознаки характеристики анізотропії прокату для сталі 20К в трьох напрямках: повздовжньому, поперечному та під кутом  $45$  градусів. Використаний підхід фрактального аналізу до профілю тимчасової кривої, що відповідає загальній роботі руйнування, в тому числі тієї частини кривої, яка відповідає енергії зародження тріщини.

3. Вперше показано, що вище значення фрактальної розмірності для сталей 70, 80,85 відповідає більш крихкому руйнуванню, а менше значення в'язкому.

Встановлено, *що* в досліджених експлуатаційних зламах канатів, задіяних в захисних оболонках атомного реактора, виявлено певний зв'язок між особливостями руйнування, пов'язаними з пошкодженістю, і показниками фрактальних

розмірностей, а саме: для сталі 70 (фрактальна розмірність структури лежить у межах 1.97-2.00, для сталі 80 – у межах 1.74-1.83, та сталі 85 – 1.9-1.95.

4. Вперше встановлено, що фрактальна розмірність змінюється залежно від наявності неметалевих включень для сталей ферито перлітного класу.

Доведено, що для коректного аналізу необхідне введення поняття мультифракталу, яке поєднує в собі фрактальну розмірність структури, фрактальну розмірність включень.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Отримані в роботі результати і встановлені зв'язки мають практичний інтерес для експрес прогнозування причин руйнування для сталей ферито-перлітного класу, зокрема сталей Дс, 35Г/40, 20К, 70, 80, 85. Отримані результати щодо фрактальної розмірності структури в поєднанні з іншими даними неруйнівного контролю, зокрема визначення коерцитивної сили, товщини стінки в посудинах тиску, тощо, дозволяють оперативно виявити найбільш небезпечну ділянку в елементах металевих конструкцій, що дає можливість попередити передчасне руйнування діючих об'єктів. Даний метод наразі активно застосовується для зварних з'єднань у відділі дослідження фізико-хімічних процесів в зварювальній дузі Інституту електрозварювання імені Євгена Оскаровича Патона НАН України.

### **Особистий внесок здобувача.**

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 14 наукових робіт, із них 5 статей у фахових виданнях, 9 – доповіді у матеріалах міжнародних конференцій. Список публікацій наведено в кінці автореферату.

За час підготовки дисертаційної роботи здобувач створив програмного супровід для підрахунку фрактальної розмірності фотографій зламів, тріщин і т.і. методом фрактального аналізу. За допомогою створеної програми ним проведено більшість досліджень поверхні сталевих зразків, для досліджуваних зразків виконано пошук залежностей між фрактальною величиною і механічними властивостями матеріалів.

### **Апробація результатів дисертації**

Основний зміст дисертаційної роботи викладено:

1. Штофель О.А., Рабкина М.Д. Использование мультифрактального анализа для оценки свойств конструкционных сталей. *Universum: Технические науки: электрон. Научн. Журн.* 2016. – №10(31) ISSN:2311-5122 (eLIBRARY.RU, EBSCO Discovery, GoogleScholar)

2. Torop, V.M., Rabkina, M.D., Shtofel', O.O. *et al.* On the Causes of Fractures of Reinforcing Ropes of the Protective Shells of Power-Generating Units of Nuclear Power Plants. *Mater Sci* 54, 240–249 (2018).

3. Штофель О.О. Застосування методу фрактального аналізу до вивчення структури металу. Науково технічний журнал МЕТАЛОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МЕТАЛІВ, 2019 - Том 91, No. 3, сс. 40-46.

4. Olga Shtopfel, Marjana Rabkina ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДО ВИВЧЕННЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ. Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування 58 (2),2019 – с.28-33. (Index Copernicus, Google Scholar, BASE, WorldCat, OpenAIRE, наукометричної бази даних "РІНЦ") ISSN: 2663-3450

5. Shtofel O, Chijskaya T., Kulieznova S., Metallographic studies of vessel steel samples: ДС, 35Г / 40Г and steel 20 by fractal analysis. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)* ISSN: 2458-925X Vol. 6 Issue 2, February – 2020

**Публікації.** Матеріали дисертації опубліковано у роботах:

6. Штофель О.А., Рабкина М.Д. Фрактальная природа трещин при анизотропии. – Київ VIII МКМУ «Зварювання та споріднені технології», 2015. – 318.

7. Штофель О. А. Метод фрактального анализа для оценки структуры конструкционных сталей. – Харьков: XVI МНПК: «Развитие науки в XXI веке», 2016. – 120-122.

8. Рабкина М.Д., Штофель О.О. Фрактальна природа тріщин при руйнуванні зварних з'єднань. – Київ: МК «Зварювання та споріднені технології - сьогодення і майбутнє», 2018 – с.77-78

9. Вовк Я. С., Ляхман А. В., Штофель О. О. Метод фрактального аналізу як сучасний підхід до вивчення структури металу, Розвиток сучасної науки: теорія, практика, інновації: XV Міжнародна науково-практична інтернет-конференція: тези доповідей, Дніпро, 29 березня 2019 р. – Ч. 1. – Дніпро: ГО «НОК», 2019 – с. 5-13.

10. Вовк Я. С., Штофель О. О. Метод фрактального аналізу: історія та розвиток. – Київ: XVII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція – Історія розвитку науки, техніки та освіти, 2019 – с. 71.

11. Вовк Я. С., Штофель О. О. Метод фрактального аналізу як сучасний підхід до вивчення фізики, Сучасні проблеми математики та її застосування в природничих науках та інформаційних технологіях: Збірка матеріалів XIV міжнародної наукової конференції для молодих вчених/ Під ред. проф. Жолткевича Г.М. – Х: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2019 – с. 31.

12. Ляхман А.В., Штофель О.О. Історія виникнення методу фрактального аналізу, XXIV Всеукраїнська наукова конференція молодих істориків науки, техніки і освіти та спеціалістів за темою: «Наука, як феномен національної культури»: Мат.конф., 19 квітня 2019 р., м.Київ. – К., 2019. - с.134-136

13. Штофель О. О., Чижська Т. Г. Підготовка металевого зразка до вивчення його мікроструктури методом фрактального аналізу. - Інноваційні вектори розвитку сучасних наукових досліджень: XXI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція: тези доповідей, Харків, 11 жовтня 2019 р. – Ч. 1. – Дніпро: ГО «НОК», 2019 – с. 48-54

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 163 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 1 додатку. Обсяг основного тексту дисертації складає 115 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 25 таблицями та 63 рисунками. Список використаних джерел містить 125 найменувань, з них 80 кирилицею та 45 латиницею

## РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ РОЛІ ФРАКТАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ В ПІДВИЩЕННІ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІАГНОСТИКИ МАТЕРІАЛУ

На даний час діагностику конструкцій, які вичерпали проектний ресурс, з метою подовження їх безпечної експлуатації, здійснюють традиційними методами неруйнівного контролю, а саме: акустичним, візуально-оптичним, магнітним, проникаючими речовинами, ультразвуковим, тощо. В деяких випадках вдаються до вирізки зразків для проведення лабораторних випробувань – вивчення металографічної структури і механічних характеристик. На базі цих результатів для видачі остаточного висновку щодо подовження безпечної експлуатації здійснюють розрахунок на довготривалу міцність окремих елементів і конструкції в цілому [1]. Проте традиційні методи досліджень по-перше, не дають досить точну кореляцію структури і властивостей і вимагають трудомісткої підготовки зразків і численних випробувань відповідно до нормативно-технічної документації. По-друге, у ряді випадків просто недопустима або неможлива вирізка зразків для випробування з діючих об'єктів машинобудування.

У зв'язку з цим перспективним напрямком доцільно вважати можливість відмовитись від проведення подібних випробувань, якщо можна встановити надійний взаємозв'язок між експлуатаційними властивостями діючих конструкцій та результатами оцінки цифрових зображень їх структури, використовуючи методологію параметризації структур.

Теорія параметризації завдяки налагодженому математичному апарату дозволяє оцінювати параметри однорідності і впорядкованості, що характеризують міру (ступінь) порушення самоподібності і відображають геометричну неоднорідність складових зображення.

*Таким чином,* через швидкий науково-технічний прогрес, а також через збільшення потреб суспільства діагностика потребує більш швидких та мобільних методів перевірки якості матеріалу. Фрактальний метод запропонував себе, як один із таких методів [2,3,4].

## **1.1 Систематизація структури металу за геометричною будовою. Співставлення структурних параметрів, встановлених методами традиційної та фрактальної металографії**

Багаточисельні природні системи настільки складні і нерегулярні, що використання тільки знайомих об'єктів класичної геометрії для їх моделювання представляється безнадійним. Стосовно структури, макроструктура металу – це його будова, яка видима неозброєним оком або за допомогою лупи, тобто при збільшеннях до 25 разів. Її вивчають на плоских зразках – темплетях, вирізаних зокрема з конструкції, а також на зламах після руйнування [5]. Для виявлення макроструктур металу поверхню темплетів ретельно шліфують, потім травлять в розчині кислот або лугів [6]. При дослідженні макроструктури металу можна виявити порушення суцільності металу (раковини, рихлість, газові бульбашки, розшарування, тріщини і т.і.), виявити розподіл домішок і неметалевих включень, форму та розташування кристалітів, а іноді навіть особливості будови окремих зерен металу. Вивчення макроструктури металу дозволяє зробити висновок про якість заготовки та правильності ведення технологічного процесу при литті, обробці тиском або зварюванні. У деяких випадках якість металу характеризується видом зламу, що дозволяє встановити, як проходить руйнування (по тілу або по межах зерен), з'ясувати причини руйнування і т.п.

В той же час, мікроструктура металу – це його будова, яка виявляється під час спостереження за допомогою світлових або електронних мікроскопів [7]. Метали і сплави складаються з великого числа кристалів різної форми (порівняно дрібних рівноосних кристалів, видовжених дендритних кристалів та рівноосних різно орієнтованих дендритних кристалів), найчастіше невидимі неозброєним оком. Зерна мають округлу або витягнуту форму, можуть бути більшими або дрібнішими і розташовуватися один щодо одного в певному порядку або випадково. [8]



Форма, розміри і взаємне розташування, а також орієнтування зерен залежать від умов їх утворення і подальшої обробки металу. Частина мікроструктури металу, що має одноманітну будову, так звана структурна складова (фаза). Зокрема для залізовуглецевих сплавів – аустеніт, ферит, цементит, перліт, ледебурит, мартенсит. Кількісне співвідношення структурних складових сплаву визначається його хімічним складом і умовами нагрівання і охолодження [9].

По Салтикову С.А. відрізняють наступні основні геометричні типи структури (Рис. 1.1):

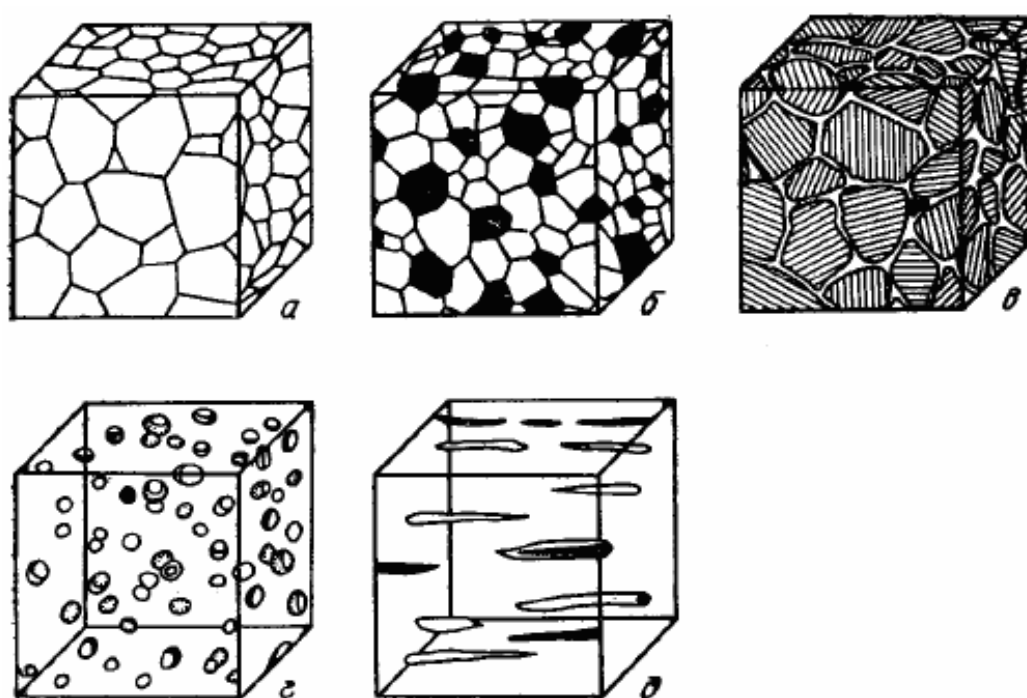


Рис. 1.1 Схематичне об'ємне зображення структур: однофазно-поліедрична – а; багатофазно-поліедрична – б; сітчаста – в; матрична – г; орієнтована – д [1]

*Однофазно-поліедрична* структура (рис. 1.1, а) складається з приблизно рівноосних кристалів однієї і тієї ж фази. У неї спостерігаються тільки поверхні розділу рівнозначних структурних складових. *Приклади*: чисті метали; тверді розчини, наприклад:  $\alpha$ -латунь, сплави нікелю з міддю, аустенітна сталь.

*Багатофазно-поліедрична* структура (рис. 1.1, б) складається з приблизно рівноосних кристалів двох і більше фаз або структурних складових. Поверхні розділу проходять між фазами одного типу і фазами різних типів. *Приклади*:

ферит-перлітна структура сталей, латунь зі структурою  $\alpha$ - і  $\beta$ -твердого розчину, ферит-аустенітна сталь.

*Сітчаста структура* (рис. 1.1, в). Одна фаза утворює більш-менш суцільну сітку навколо кристалітів другої фази або другої структурної складової. У граничному випадку суцільної сітки існують поверхні розділу тільки між структурними складовими різних типів. *Приклади*: сітка вторинного цементиту в сталі, потрійна фосфідна евтектика в сірому чавуні,  $\alpha$ -ферит в аустенітній сталі.

*Матрична структура* (рис. 1.1, г). Одна фаза утворює основу (матрицю) структури, в якій розташовуються частинки однієї або декількох інших фаз. *Приклади*: структури, що виникають в результаті процесів виділення, зокрема в сплавах міді з алюмінієм або міді з хромом; в нікелевих жароміцних сплавах, структура неповного відпалу сталі, евтектична і евтектоїдна структури, виділення карбідів в високолегованих сталях.

*Орієнтована структура* (рис. 1.1, д). Приклади: витягнуті зерна катаних або тягнутих металів і сплавів [10].

Таким чином, можна констатувати, що мікроструктура є фракталом, так як вона самоподібна, тобто має ідентичні деталі необмежено маленького розміру. З другого боку, структура, як очевидно, занадто нерегулярна, щоб описуватися звичайною геометрією. Тим не менш, перш ніж перейти до фрактальних оцінок, доцільно розглянути основні методи кількісної металографії.

## 1.2 Основні методи кількісної металографії

Незалежно від специфічних ознак позначеної кількості основних геометричних типів структури і виду спостережуваних структурних складових, характерні параметри структури завжди можна визначити, використовуючи одні і ті ж принципи вимірювання і обробки даних.

### 1.2.1 Аналіз по площах

Цей метод дозволяє визначити об'ємну частку окремих фазових складових в структурі сплаву і розподіл мікрочастинок різних фаз за розмірами. [2]

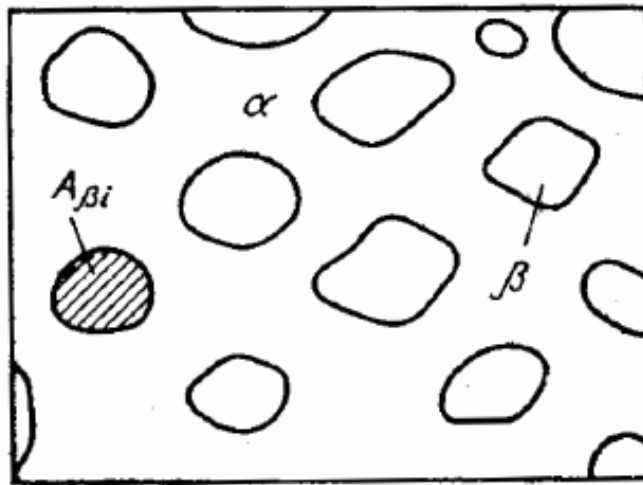


Рис.1.2 Планіметрированіє елементів структури

Об'ємна частка  $V_\beta$  фази  $\beta$  визначається через суму окремих перетинів  $A_{\beta i}$  в межах загальної площі  $A$

$$V_\beta = \frac{\sum_{i=1}^{m_\beta} A_{\beta i}}{A} \cdot 100\%$$

### 1.2.2 Визначення середнього розміру зерен

Для однофазно-поліедричної структури можливо визначення середньої площі зерна  $A$  (середньої площі перетинів в площині шліфа) шляхом підрахунку зерен, що знаходяться в межах заданої вимірюваної площі (рис. 1.3)

$$\bar{A} = A / (u + 0,5v + 0,25\omega),$$

де  $u$  – кількість зерен, які повністю потрапили в межі заданої вимірюваної площі;

$v$  – кількість зерен, по яким проходить гранична лінія вимірюваної площі;

$\omega$  – кількість зерен, які знаходяться в кутах вимірюваної площі (для квадратної й прямокутної площі дорівнює 4).

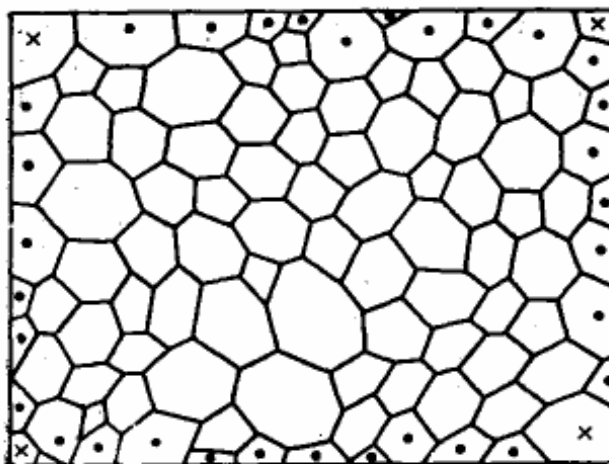


Рис. 1.3 Принцип визначення середньої площі зерна в однофазній поліедричній структурі:

Найбільш точні результати отримано в тому випадку, коли всередині поля зору знаходяться від 10 до 20 перетинів досліджуваної структурної складової. Для отримання достовірної середньої величини, яка характеризує всю поверхню шліфа, необхідно заміряти 10 – 20 полів зору, рівномірно розташованих по всій поверхні шліфа. В більшості випадків досягається точність, яка задовольняє практичним вимогам, якщо заміряно 200÷250 мікрочастинок [11].

### 1.2.3 Точковий метод

Запропонований О.О. Глаголевим [4], точковий метод, використовується для визначення об'ємних часток структурних складових або фаз. На досліджувану структуру накладається сітка. Підраховується число точок, що лежать в перерізі мікрочастинок досліджуваної фази (рис. 1.4). Об'ємна частка  $\beta$ -фази визначається як  $V_{\beta} = (m_i/z) \cdot 100\%$ , де  $m_i$  – число точок, що потрапили на частки  $\beta$ -фази;  $z$  – загальне число точок в сітці.

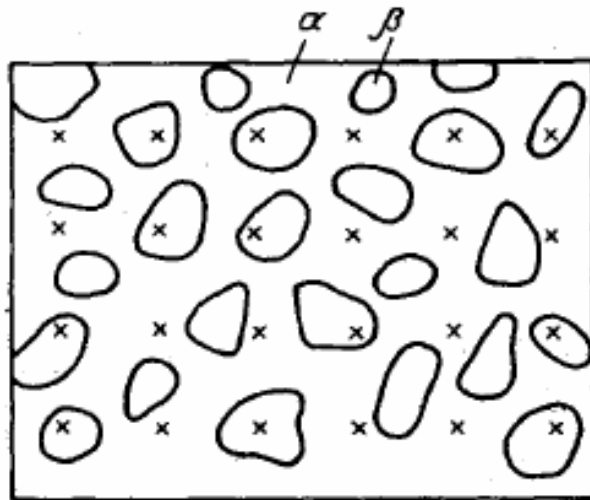


Рис. 1.4. Принцип точкового аналізу (× – перехрестя накладеної сітки)

Точність залежить від загального числа  $z$  підрахованих точок і площі, займаної частинками дисперсної фази на зображенні.

Абсолютне значення похибки вимірювання  $\dot{g}$  визначається як:

$$\dot{g} = t \cdot \sqrt{V_{\beta}(100 - V_{\beta})/P}.$$

Величина стандартного відхилення  $t$  визначається за заданою для результатів даного дослідження довірчої ймовірності  $P$ , табл. 1.1.

Таблиця 1.1

**Зв'язок між стандартним відхиленням  $t$  і довірчою ймовірністю  $P$  результатів вимірювань**

<b>P</b>	<b>T</b>
0,50	0,6745
0,80	1,2816
0,90	1,6449
0,95	1,9600
0,98	2,3263
0,99	2,5758

Збільшення потрібно вибирати таким чином, щоб досліджувані структурні складові були досить великими для точного визначення: чи потрапила точка в

перетин фази чи ні. Відстань між точками в сітці повинна бути такою, щоб не більше однієї точки потрапило в перетин досліджуваної мікрочастинки.

#### 1.2.4 Лінійний аналіз

Принцип цього методу полягає в тому, що на зображення досліджуваної структури накладається сімейство вимірювальних прямих ліній (заданої довжини), після чого вимірюються хорди, що відсікаються перетином зерен на цих лініях; підраховується число точок в перетинах вимірювальних ліній і меж зерен; визначається сумарна довжина вимірювальних ліній [5].

За допомогою ліній можна визначити наступні параметри однофазно-поліедричної структури. Середній лінійний розмір зерен, мкм,

$$\bar{D}_\alpha = L / N_{\alpha\alpha} M,$$

де  $L$  загальна довжина вимірювальних ліній, мкм;

$N_{\alpha\alpha}$  – число точок перетину кордонів зерен з вимірювальними лініями;

$M$  – збільшення мікроскопа.

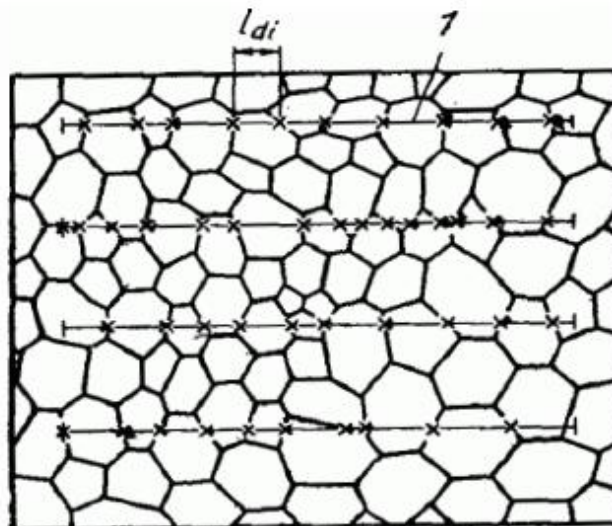


Рис.1.5. Принцип лінійного аналізу однофазно-поліедричної структури:

1 – вимірювальна лінія, × – точки перетину прямих ліній з межами зерен

Середній лінійний розмір зерна – це середня довжина хорди, яку утворює вимірювальна лінія в межах перетину зерна. Отже, лінійний розмір зерна є

двомірною величиною і не має однозначного зв'язку з об'ємною величиною зерна. Наприклад, з діаметром зерна.

Питома поверхня зерен  $S_{\alpha\alpha}$  визначається як площа поверхні ( $\text{мм}^2$ ) зерен, яка припадає на  $1 \text{ мм}^3$  об'єму зразка.

$$S_{\alpha\alpha} = 4N_{\alpha\alpha} M/L.$$

На відміну від середнього лінійного розміру зерна,  $S_{\alpha\alpha}$  представляє точну і для всіх випадків представницьку об'ємну характеристику структури. Отже, стереометричну величину. Так як поверхні меж зерен є місцями підвищеної концентрації дефектів і дуже впливають на процеси дифузії і виділення, на процеси зміцнення і знеміцнення, а також на корозійні процеси в твердих тілах, питома поверхня кордонів зерен представляє собою фізично обґрунтовану характеристику розміру зерна. Між цими структурними параметрами існує залежність  $S_{\alpha\alpha} = 4/D_{\alpha}$ .

### 1.2.5 Використання лінійного аналізу для матричної структури

В цьому випадку визначаються:

- довжини хорд  $l_{\alpha}$ ,  $l_{\beta}$ , які визначають на вимірювальних лініях перетину частинок різних фаз;
- кількість  $N_{\alpha\beta}$  точок перетину вимірювальних ліній з межами фаз  $\alpha$  і  $\beta$ ;
- сумарна довжина всіх вимірювальних ліній  $L$ .

За цими даними можна розрахувати такі параметри структури:

Об'ємна частка розподіленої в матриці  $\beta$ -фази, %,

$$V_{\beta} = \left( L_{\beta} / L \right) \cdot 100\%. L_{\beta} = \sum_{i=1}^{m_{\beta}} l_{\beta i},$$

де  $L_{\beta}$  – сума всіх довжин хорд в  $\beta$ -фазі, мкм;

$m_{\beta}$  – число хорд в  $\beta$ -фазі

Середній лінійний розмір частинок  $\beta$ -фази, мкм,

$$\overline{D}_{\beta} = \frac{L_{\beta}}{1/2 N_{\alpha\beta} M} = \frac{2L_{\beta}}{N_{\alpha\beta} M}.$$

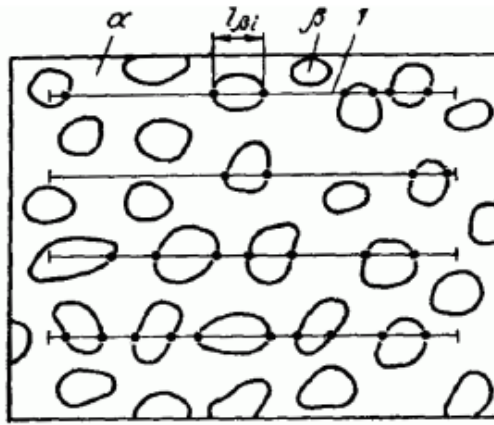


Рис. 1.6. Принцип лінійного аналізу матричної структури: 1 – вимірювальна лінія, × – точки перетину прямих ліній з межами фаз.

### 1.2.6 Аналіз багатофазно-поліедричної структури

Надані вище формули легко видозмінити для такого типу структури. Наприклад, середній лінійний розмір часток  $\beta$ -фази визначається за тією ж формулою, що і в разі матричної структури, а середній лінійний розмір зерна  $\alpha$ -фази, мкм:

$$\bar{D}_{\alpha} = V_{\alpha} / 100 \cdot L / \left( N_{\alpha\alpha} + \frac{1}{2} N_{\alpha\beta} \right) M.$$

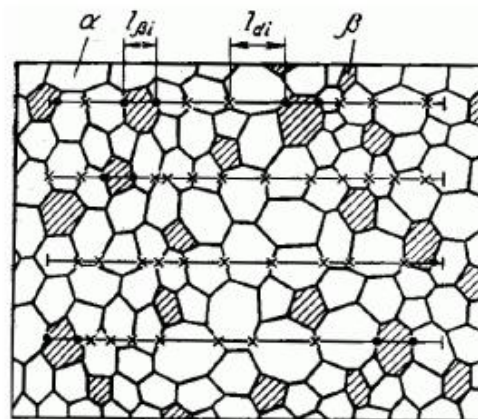


Рис. 1.7. Принцип лінійного аналізу багатофазної поліедричної структури



### 1.2.7 Аналіз орієнтованої структури

При його проведенні на зображення накладаються дві групи вимірювальних ліній – паралельно і перпендикулярно орієнтації структури і для опису структури наводяться два лінійних параметра.

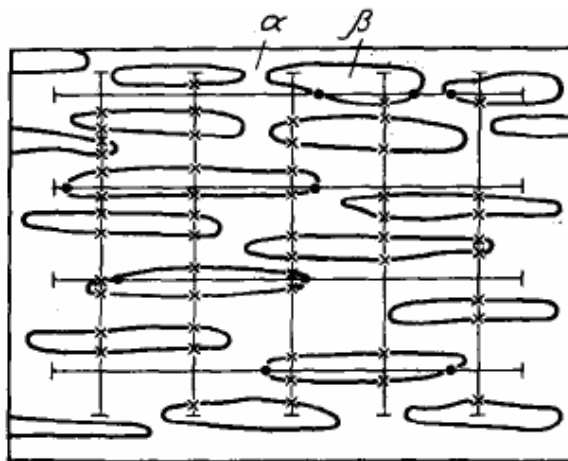


Рис. 1.8. Принцип лінійного аналізу орієнтованої структури

Таким чином, незважаючи на те, що геометричне уявлення досить наближена характеристика стосовно структури, проте воно дає можливість дослідити певні ознаки структури, такі як – середній і поперечний розмір зерна, середня площа зерна і кількість зерен на одиницю площі, а також протяжність границь зерен. Для більш ретельного дослідження структури використовують статистичні аналізи – розбиття зерен однакових характеристик на групи і порівняння із стандартними таблицями. Отже кількісні характеристики структури шліфа дозволяють, за допомогою спеціальних методів, перейти до опису просторової структури сплавів [12, с.261-316].

### 1.3 Поняття фрактала і фрактальної розмірності. Співставлення розмірів зерен з фрактальною розмірністю меж зерен

Традиційні методи геометричної оцінки форми різних предметів, в тому числі і в матеріалознавстві, засновані на наближеній апроксимації структури досліджуваного об'єкта геометричними фігурами, наприклад лініями, відрізками, площинами, багатокутниками, багатогранниками, сферами. Всі ці

прийоми ґрунтуються на класичній евклідовій геометрії з цілою топологічною розмірністю. До появи ідеї *фрактальної* розмірності, поняття «*розмірність*» використовували в трьох значеннях:

- Розмірність Евклідова простору ( $E = 1, 2, 3$ ).
- Топологічна розмірність об'єкту:  $d_T = 0$  (точка),  $d_T = 1$  (відрізок прямої),  $d_T = 2$  (плоска фігура) і т.д. топологічна розмірність не перевищує розмірність евклідова простору, в якому знаходиться дана множина  $d_T \leq E$ .
- Кількість змінних, що описують динамічну систему  $N = 1, 2, 3 \dots$

Всі ці розмірності можуть бути тільки цілими числами.

Нові уявлення про форму реальних об'єктів природи, зокрема, о структурах в матеріалознавстві, засновані на понятті фракталів, яке вперше сформулював Б. Мандельброт [13]. Він ввів поняття не тільки фрактала, а й фрактальної геометрії, що відрізняється від евклідової дробовими розмірностями.

В якості кількісної міри геометричної складності множини (об'єкту) Бенуа Мандельброт запропонував використовувати фрактальну розмірність  $D$ , яка показує наскільки щільно й рівномірно елементи даної множини заповнюють евклідовий простір ( $D \leq E$ )

До числа фракталів відносять геометричні об'єкти (лінії, поверхні, об'ємні тіла), які мають сильно порізану форму і демонструють деяку повторюваність в широкому діапазоні масштабів. Повторюваність може бути повною (в цьому випадку говорять про регулярні фрактали), або може спостерігатися певний елемент випадковості (такі фрактали називають випадковими). Структура випадкових фракталів на малих масштабах не є точно ідентичною всьому об'єкту, але їх статистичні характеристики збігаються [14].

Б. Мандельброт звернув увагу на те, що контури, поверхні і обсяги оточуючих нас предметів не такі рівні, гладкі і досконалі, як прийнято вважати. Отже повинні існувати інші математичні методи для їх опису. Для кількісної оцінки цих відхилень від ідеальності (звивистості контуру, зморшкуватості поверхні, системи тріщин в об'ємі зразка або пористості об'єму) Б.

Мандельброт застосував математичний апарат, розроблений на початку XX ст. Ф. Хаусдорфом (1868-1942) і А. С. Безековічем (1891-1970). Ця нова кількісна оцінка – через дробову розмірність Хаусдорфа–Безековіча стосовно ідеальних об'єктів класичної геометрії Евкліда давала ті ж чисельні значення, що і відома топологічна розмірність (дорівнює нулю для точки, одиниці – для плавної лінії, двом – для фігури і поверхні, трьом – для тіла і простору). Але в разі оцінки морфології реальних структур нова розмірність проявляла більш тонку чутливість до будь-якого роду недосконалостей реальних об'єктів. Так, відрізок прямої, відрізок синусоїди і найскладніша крива невидимі при використанні топологічної розмірності – всі вони мають розмірність, рівну одиниці, тоді як їх розмірність за масштабною шкалою Хаусдорфа–Безековіча різна і дозволяє числом вимірювати ступінь звивистості лінії. Отже в міру зростання звивистості лінії або шорсткості поверхні розмірність Хаусдорфа–Безековіча збільшується [15, 16].

В даний час теорії фракталів і мультифракталів широко використовуються для опису властивостей самоподібності і складного скейлінга (масштабна інваріантність), які спостерігаються в самих різних фізичних ситуаціях [17]. Самі різні об'єкти природи можуть бути віднесені до спеціального класу "мультифракталів", досить складно знайти область науки, в якій відсутні представники цього класу [18].

Фрактали виявляють багато спільного з природними об'єктами. Але фрактал вигідно відрізняється від природного об'єкта тим, що має строге математичне визначення і піддається суворому опису та аналізу. Для математиків фрактали – це об'єкти з дробовою (фрактальною) розмірністю. Для фізиків – це об'єкти, які характеризуються самоподібністю в широкому інтервалі масштабів (всі ці фігури подібні будь-якому своєму фрагменту). Матеріалознавець повинен бачити у фрактальності можливість кількісної оцінки реальної структури матеріалів.

Багато природних фракталів (поверхні розлому гірських порід і металів, хмари, блискавки, турбулентні потоки, піна, гелі, частинки сажі і т.д.) на

перший погляд позбавлені явної геометричної подібності, але наполегливо відтворюють в кожному фрагменті статистичні властивості цілого. Така статистична подібність, або самоподібність в середньому виділяє фрактали серед безлічі природних об'єктів.

Для кількісного опису фракталів достатньо однієї величини – фрактальної розмірності або параметра, що описує збереженість статистичних характеристик при зміні масштабу.

Аналіз традиційних методів дослідження структури металів – оптичної мікроскопії, зокрема кількісної металографії,; електронної мікроструктури, а також кристалографічної текстури шляхом рентгеноструктурного аналізу, свідчить, що жоден з них не може бути універсальним і придатним для вирішення повного обсягу завдань ідентифікації кількісних характеристик металу шляхом аналізу його структури.

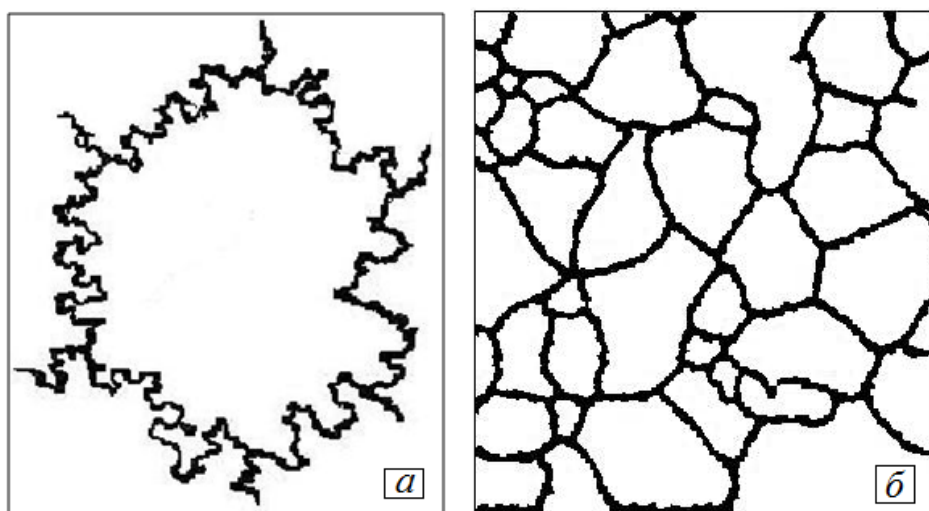


Рис 1.9 Приклад об'єкта фрактальності межі зерна (а) після трансформації вихідного зерна в мікроструктурі (б) в інформаційну межу, що «запам'ятала» минулі критичні стани, що розкриваються методом мультифрактальної параметризації (канонічний спектр) [19].

В металографії фрактальний аналіз стосується мікроскопічних зображень поверхонь матеріалів. При цьому за допомогою мультифрактальних характеристик можна описати структуру і механічні властивості матеріалів, а

саме: ступінь шорсткості поверхонь, хімічні зміни поверхні, деформацію матеріалів та ін.

За основу береться формула залежності кількості кубів  $N$  від довжини грані куба  $\varepsilon$  при малих  $\varepsilon$ , що покриває множини

$$D = \frac{-\ln N}{\ln \varepsilon / N}$$

В якості приклада розглянемо взаємозв'язок межі зерна з тілом зерна, як показано на рис. 1.9.

Виходячи з цих уявлень, порівняємо за наведеною вище формулою розмір зерна згідно до класифікації (ГОСТ-5639-82) рис 1.10 з фрактальною розмірністю меж зерен (Таблиця 1.2)

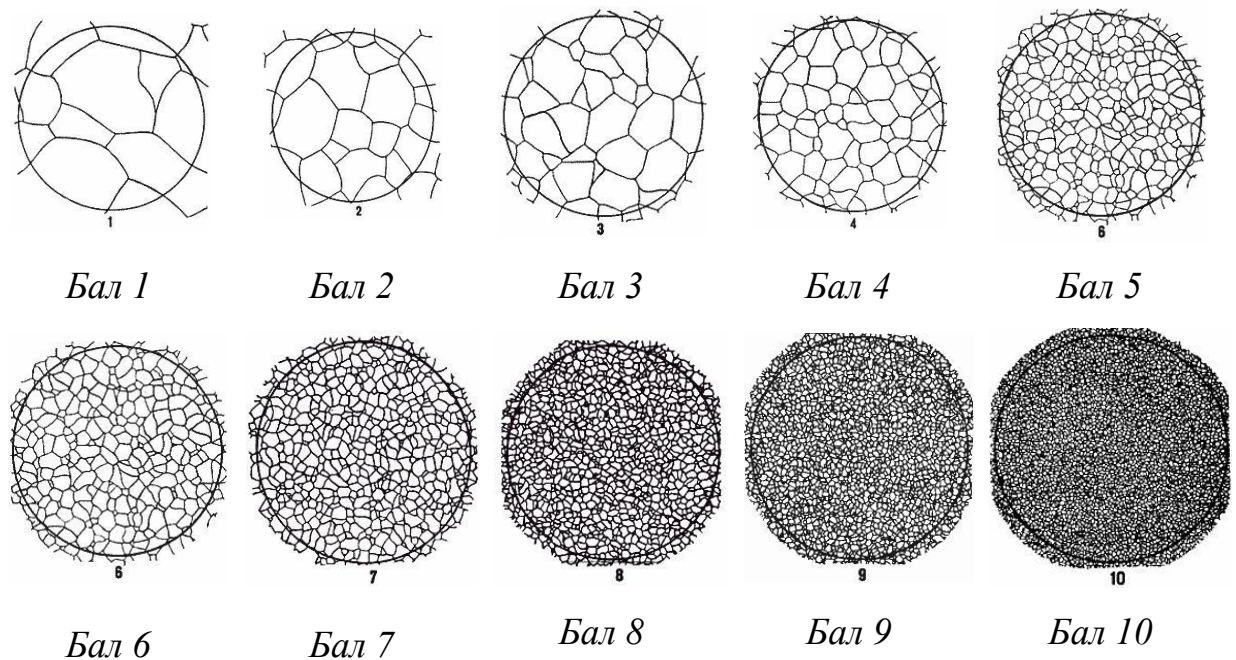


Рис 1.10. Розміри зерен згідно з ГОСТ-5639-82

Таблиця 1.2

**Співставлення розмірів зерен з фрактальною розмірністю меж зерен**

Шкала величин зерен по балам	1	2	3	4	5
Значення фрактальної розмірності	1.31	1.34	1.41	1.44	1.45
Шкала величин зерен по балам	6	7	8	9	10
Значення фрактальної розмірності	1.46	1.58	1.63	1.72	1.81

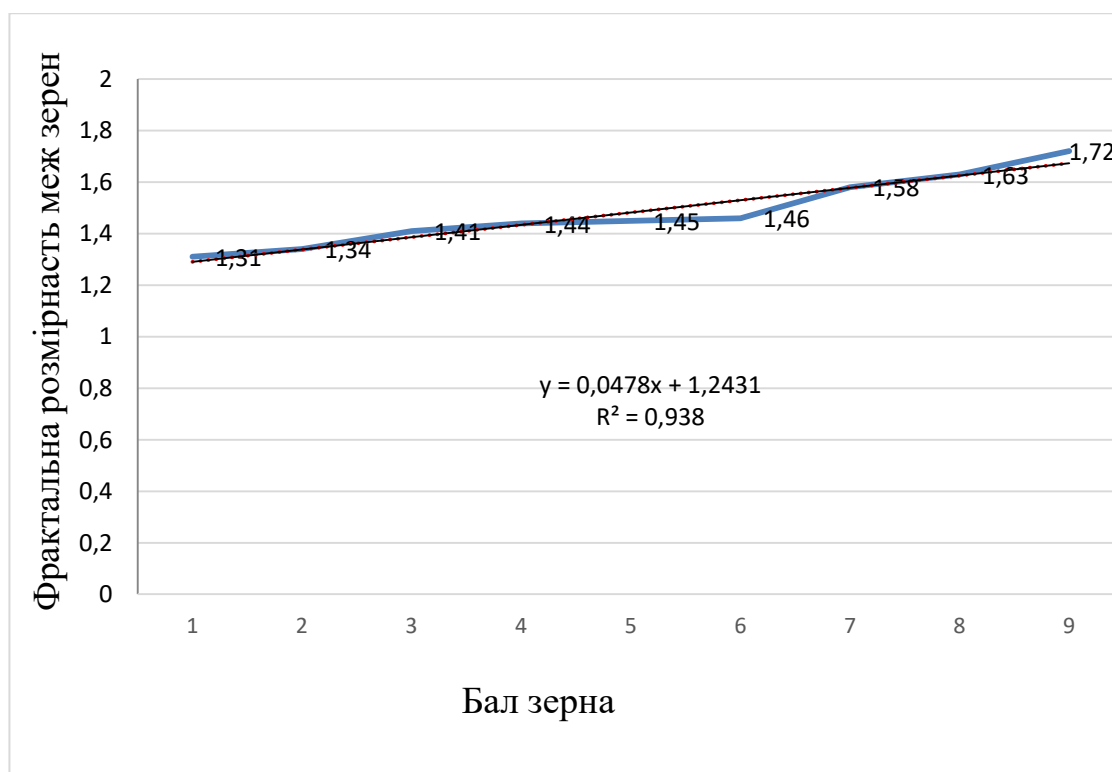


Рис 1.11 Графічне зображення даних таблиці 1.2

Таким чином, високе значення достовірності апроксимації (близько 1) дозволяє заключити, що взаємозалежність між структурними і фрактальними параметрами має лінійну кореляцію.

#### 1.4 Застосування фрактального підходу до оцінки структури і експлуатаційних властивостей конструкційних сталей

Суть фрактального підходу полягає в обробці масштабуванням фрактальної структури і описів розподілу будь-якої структурної характеристики при даному масштабуванні. Так, у твердому тілі фрактальні структури дефектів виникають при інтенсивному зовнішньому навантаженні, що спричиняє виникнення дефектів значної щільності.

Геометричним носієм при масштабуванні є сітка з квадратними осередками різного розміру [Іванова В.С.]. [20].

Кількісна характеристика основних елементів мікроструктури: перліту, мартенситу, нітридів і карбідів проводиться на підставі зіставлення структури із зразками відповідних шкал стандарту ГОСТ 8233-56 [21]. При цьому оцінку нітридів, карбідної сітки і карбідної неоднорідності проводять порівнянням

найгіршого за включеннями поля зору, що зустрічається при перегляді площі шліфа, з відповідними шкалами цього стандарту. Для більш точного кількісного металографічного аналізу структурних складових застосовують лінійний або планіметричний метод. Вважаючи метод фрактального аналізу адаптованим на зіставлення розмірів зерен (ГОСТ-5639-82) [22] з фрактальної розмірністю границь рис. 1.10 – 1.11, застосуємо метод і для ГОСТу 8233-56 [23].

Отримані фрактальні розмірності для шкал основних елементів структури сталі - перліту, мартенситу, нітридів і карбідів занесені у відповідні таблиці (Таблиця 1.3 – Таблиця 1.9) та побудовані графіки залежностей на відповідних рисунках (рис.1.12 – рис. 1.18).

Таблиця 1.3

Визначення фрактальної розмірності дисперсності пластинчастого  $D_1$  і зернистого  $D_2$  перліту - при збільшенні 1000.

Бал зерна	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D_1$	1,816	1,804	1,809	1,814	1,818	1,812	1,796	1,790	1,785	1,780
$D_2$	1,786	1,743	1,766	1,738	1,742	1,749	1,729	1,717	1,707	1,695

Таблиця 1.4

Визначення фрактальної розмірності розмірів голок мартенситу  $D_3$  - при збільшенні 1000.

Бал зерна	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D_3$	1,791	1,804	1,801	1,798	1,785	1,797	1,804	1,793	1,795	1,775

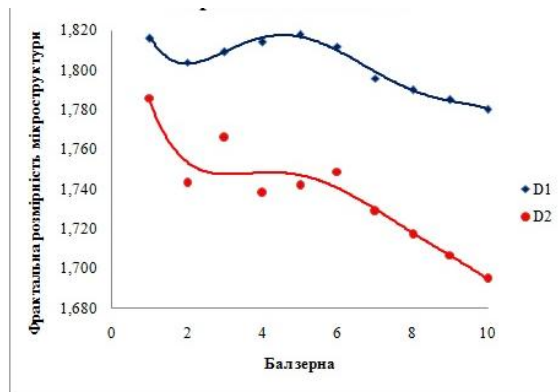


Рис. 1.12. Зв'язок фрактальної  
розмірності із перлітними  
шкалами табл.1.3

Отже, рис.1.12. виявлено схожу кореляцію для дисперсності пластинчастого  $D_1$  і зернистого  $D_2$  перліту - при збільшенні 1000. Явної залежності розмірів голок мартенситу  $D_3$  - при збільшенні 1000 не виявлено.

Таблиця 1.5

Визначення фрактальної розмірності нітридів  $D_4$  - при збільшенні 500.

Бал зерна	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D4	1,397	1,42	1,425	1,436	1,444	1,455	1,47	1,481	1,498	1,52

Таблиця 1.6

Визначення фрактальної розмірності карбідної сітки  $D_5$  при збільшенні 500 та карбідної неоднорідності  $D_6$  - при збільшенні 100.

Бал зерна	1	2	3	4	5	6
$D_5$	1,831	1,787	1,781	1,787	1,786	1,783
$D_6$	1,811	1,79	1,785	1,796	1,794	1,792





D8	1,783	1,726	1,726	1,731	1,727	1,712	1,708	1,739	1,775	1,809
%	100	99	97,5	95	90	85	75	50	25	0

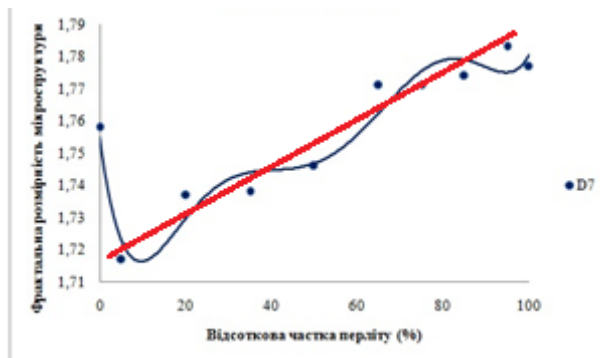


Рис. 1.15. Зв'язок фрактальної розмірності із перлітно-ферітною шкалою

Отже, на рис.1.15 виключаючи нульову точку, де частка перліту є 0%, спостерігаємо лінійну залежність фрактальної розмірності та співвідношення фериту та перліту, що в подальшому дає в повній мірі використовувати метод фрактального аналізу до ферито-перлітних структур. Явної залежності фрактальної розмірності співвідношення мартенситу і троститу в структурі не спостерігається.

Таблиця 1.9

Визначення фрактальної розмірності співвідношення зернистого (середній відсоток площі, зайнятої зернистим перлітом) і пластинчастого перліту - при збільшенні 500.

Бал зерна	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D9	1,794	1,768	1,73	1,755	1,766	1,737	1,717	1,727	1,727	1,744
%	0	5	20	35	50	65	85	90	95	100

При визначенні фрактальної розмірності співвідношення зернистого і пластинчастого перліту - при збільшенні 500 не спостерігається явної залежності.

Таким чином, отримані залежності фрактальної розмірності із дисперсності пластинчастого  $D_1$  і зернистого  $D_2$  перліту, фрактальної розмірності нітридів  $D_4$  та фрактальної розмірності співвідношення фериту і перліту  $D_7$  в структурі дають можливість в подальшому працювати із ферито-перлітними структурами, а також визначати кількість нітридів в сталі.

Отже одним з перспективних напрямків моделювання складних систем, до яких відноситься структура металу, є використання методу мультифрактальної динаміки [24]. Тобто фрактальна геометрія описує структуру більш ретельно, але за умовою, що дана структура є фрактальною. При цьому можливо встановити взаємозв'язок між фрактальною розмірністю і властивостями матеріалу і спрогнозувати поведінку та характер механічних властивостей за допомогою фрактальних множин.

Ці уявлення набули свого розвитку у роботах [Антипов О.І. "Фрактальні методи аналізу та прогнозування для самоорганізованих технічних, біологічних та економічних систем", дис... Самара 2011 р [25]. У роботі [26] застосована теорія фракталів до аналізу структуроутворення металів при зварюванні. Успішний аналіз управління структуроутворенням з позиції теорії фракталів надано при технологічних процесах – різних видах термообробки, легування, найшвидшого загартування і т.п. [Роботи Іванової В.С., Анварова А.Д., Кронвера Р.М.] [27, 28, 29]. Відповідно, теорія фракталів підходить і для діагностики металів. Видається вельми доцільним спрогнозувати поведінку корозійного зносу за допомогою фрактальних величин.

Отже мікроструктура є фракталом оскільки у нескінченності є деталі необмежено маленького розміру, щоб описуватися звичайною геометрією і нескінченність самоподібна; скупчення дислокацій є фракталом, оскільки спочатку розподіл дефектів є однорідним, потім утворюються скупчення у вигляді клубків і пухких стінок-осередків і, на завершення, формується чітко

виражена чарункова (коміркова) структура; можливо встановити взаємозв'язок між фрактальною розмірністю і властивостями матеріалу.

Слід зауважити, що структура метала досить неоднорідна. Структурна неоднорідність полікристала, в цілому, як відомо, обумовлена по-перше: різною орієнтацією окремих зерен до напрямку діючого навантаження, по-друге: різними характеристиками міцності, що залежать від розподілу легуючих елементів і домішок. У ряді випадків може спостерігатися структурна неоднорідність у вигляді макроділянок значних розмірів (особливо в великих обсягах металу, поковки великого розміру, товстолистовий прокат) з підвищеним і зниженим вмістом легуючих елементів. Ці ділянки, зокрема по-різному чинять опір малоцикловій деформації і руйнуванню внаслідок їх різних вихідних характеристик. Для ретельного дослідження неоднорідності металу, його характеристик, набутих в результаті певного навантаження тощо, необхідно дослідити «свіжий» метал та порівняти данні з металом, який має структурну неоднорідність.

*Таким чином, фрактальний аналіз в матеріалознавстві – це математичний алгоритм виявлення єдиного числового елемента для опису багаторівневих структур, якими є, зокрема, структури металів, поверхні зламів, зони руйнування, структурні межі в'язко-крихкого переходу і т.п.*

## **ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1**

1. Сформульовано сутність фрактального підходу, яка полягає в обробці масштабуванням фрактальної структури і описів розподілу будь-якої структурної характеристики при даному масштабуванні.

2. Постулюється, що фрактальна геометрія описує структуру більш ретельно, ніж стандартна металографія, але за умовою, що дана структура є фрактальною. Встановлюється взаємозв'язок між фрактальною розмірністю і механічними властивостями матеріалу з метою прогнозування експлуатаційних характеристик за допомогою фрактальних множин.

3. Проведено аналіз вибору металів із феритно-перлітною структурою, до яких саме і відноситься балона сталь Дс та сталь 20К обичайок колон.

**Результати експериментальних досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:**

1. Штофель О.О. Застосування методу фрактального аналізу до вивчення структури металу. Науково технічний журнал МЕТАЛОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МЕТАЛІВ, 2019 - Том 91, No. 3, сс. 40-46.

2. Штофель О.А., Рабкіна М.Д. Фрактальная природа трещин при анизотропии. – Київ VIII МКМУ «Зварювання та споріднені технології», 2015. – 318.

3. Штофель О. А. Метод фрактального анализа для оценки структуры конструкционных сталей. – Харьков: XVI МНПК: «Развитие науки в XXI веке», 2016. – 120-122.

4. Вовк Я. С., Ляхман А. В., Штофель О. О. Метод фрактального аналізу як сучасний підхід до вивчення структури металу, Розвиток сучасної науки: теорія, практика, інновації: XV Міжнародна науково-практична інтернет-конференція: тези доповідей, Дніпро, 29 березня 2019 р. – Ч. 1. – Дніпро: ГО «НОК», 2019 – с. 5-13.

5. Вовк Я. С., Штофель О. О. Метод фрактального аналізу: історія та розвиток. – Київ: XVII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція – Історія розвитку науки, техніки та освіти, 2019 – с. 71.

6. Вовк Я. С., Штофель О. О. Метод фрактального аналізу як сучасний підхід до вивчення фізики, Сучасні проблеми математики та її застосування в природничих науках та інформаційних технологіях: Збірка матеріалів XIV міжнародної наукової конференції для молодих вчених/ Під ред. проф. Жолткевича Г.М. – Х: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2019 – с. 31.

7. Ляхман А.В., Штофель О.О. Історія виникнення методу фрактального аналізу, XXIV Всеукраїнська наукова конференція молодих істориків науки, техніки і освіти та спеціалістів за темою: «Наука, як феномен національної культури»: Мат.конф., 19 квітня 2019 р., м.Київ. – К., 2019. - с.134-136

## РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Основні об'єкти дослідження

В якості об'єкта було дослідження використано:

1. Зображення структур еталонних шкал згідно до ГОСТ 5639-82, приклади яких наведені на рис 1.10, для встановлення кореляційних залежностей між мультифрактальними параметрами й кількісною металографією.

2. Зображення структур еталонних шкал згідно до ГОСТ 8233-56, приклади яких наведені на рис 2.1, для аналізу вибору металів з переважно феритно-перлітною структурою, результати (Таблиця 1.3 – Таблиця 1.9) та побудовані графіки залежностей на відповідних рисунках (рис.1.12 – рис. 1.18).

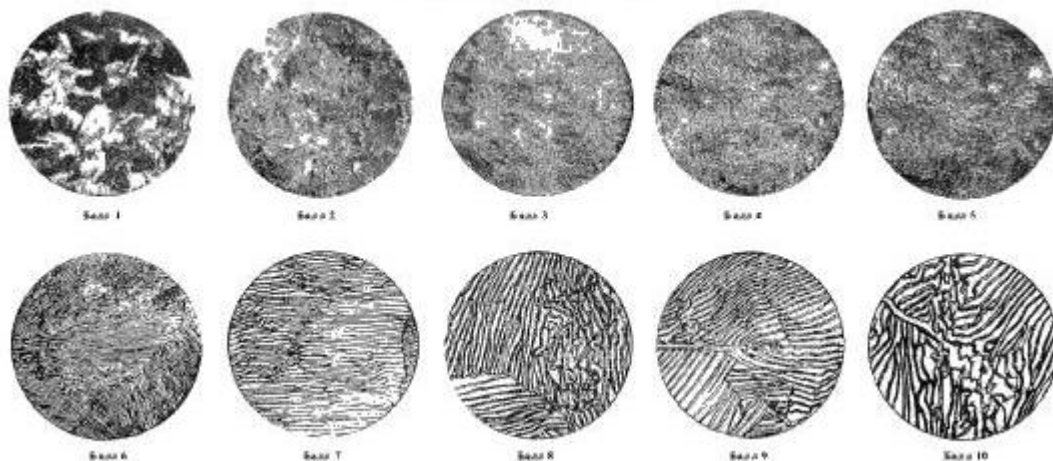


Рис. 2.1. ШКАЛА 1. Пластинчастий перліт 1000

3. В якості матеріалів для співставлення результатів фрактографічного і фрактального, металографічного і хімічного, рентгенівського і електронно-мікроскопічного аналізів, а також неруйнівного контролю і службових характеристик, прийнято фрагменти зруйнованого обладнання із ряду конструкційних сталей феритно-перлітного класу.

Вибір Сталі Дс (ГОСТ 949-73) обґрунтовується її застосуванням для кисневих балонів по ГОСТ 949-73, ємністю 40 л під робочим тиском 14,7 МПа різного терміну експлуатації (Таблиця 3.1) [30], а також для порівняння 35Г.

Вибір Сталі 20К (ДСТУ 8540:2015) обґрунтовується її застосуванням для обичайок ректифікаційних колон  $\varnothing 2200 \times 12$  мм, для оцінки впливу анізотропії прокату металу на опір руйнуванню [31];

Вибір Сталі 85 (ГОСТ 14959-79) обґрунтовується її застосуванням для арматурних канатів в блоках АЕС, причини передчасних чисельних розривів яких залишалися до сих пір поза увагою дослідників [32], а також для порівняння Сталь 70 та 80.

Демонстрація методики оцінки впливу анізотропії прокату металу на опір руйнуванню по фрактальним параметрам поверхні руйнування була проведена на фрагментах обичайки колони ректифікації вуглеводнів.

## **2.2 Відомості про методи дослідження**

Поставлені завдання дослідження зумовили необхідність застосування як стандартних методів визначення структури і механічних властивостей металу, так і нестандартних методів, зокрема методу мультифрактальної параметризації, а також методу визначення коерцитивної сили.

### **2.2.1 Застосування неруйнівних методів контролю, зокрема визначення коерцитивної сили**

При обстеженні об'єктів, які знаходяться в експлуатації, найбільш прийнятно застосовувати неруйнівний контроль, що дозволяє зберегти експлуатаційну придатність даного об'єкту без порушення його несучої здатності. Перш за все – це візуально-оптичний метод, який не потребує будь-якого обладнання і може реалізовуватися за допомогою простих вимірювальних засобів.

Як відомо неруйнівний контроль побудовано на непрямому визначенні властивостей і характеристик матеріалів [33]. Залежно від фізичних явищ, покладених в його основу, неруйнівний контроль, згідно прийнятій класифікації, підрозділяється на наступні види (*Таблиця 2.1*). У міжнародній практиці для неруйнівного контролю (*Nondestructive testing, NDT*) [34] прийнято скорочені позначення, які наведені в *Таблиці 2.2*.

Варто зазначити, що при всьому різноманітті методів неруйнівного контролю в даній роботі основне застосування знайшли наступні методи: магнітний (визначення коерцитивної сили) і ультразвуковий (визначення товщини стінки).

Таблиця 2.1

### Класифікація неруйнівного контролю

Вид контролю	Способи оцінки отриманих результатів
Магнітний	Аналіз взаємодії магнітного поля з контрольованим об'єктом
Електричний	Реєстрація параметрів електричного поля, що взаємодіє з контрольованим об'єктом або виникає в контрольованому об'єкті в результаті зовнішньої дії
Вихрострумний	Аналіз взаємодії електромагнітного поля перетворювача з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться в контрольованому об'єкті
Радіохвильовий	Реєстрація змін параметрів електромагнітних хвиль радіодіапазону, що взаємодіють з контрольованим об'єктом
Тепловий	Реєстрація змін теплових або температурних полів об'єктів, викликаних дефектами
Оптичний	Реєстрація параметрів оптичного випромінювання, що взаємодіє з контрольованим об'єктом
Радіаційний	Реєстрація та аналіз проникаючого іонізуючого випромінювання після взаємодії з контрольованим об'єктом
Акустичний (ультразвуковий)	Реєстрація параметрів пружних хвиль, порушуваних і (або) виникаючих у контрольованому об'єкті
Проникаючими речовинами (капілярний)	Проникнення речовин в порожнини дефектів контрольованого об'єкта



Таблиця 2.2

## Скорочені позначення видів неруйнівного контролю

№ п/п	Види контролю	Умовні позначки
1	Контроль з застосуванням акустичної емісії	АЕТ
2	Електромагнітний контроль	ЕТ
3	Контроль течешуком	LT
4	Магнітопорошковий контроль	MT
5	Нейтронна дефектоскопія	NRT
6	Контроль з застосуванням проникаючими речовинами	PT
7	Радіографічний контроль	RT
8	Ультразвуковий контроль	UT
9	Візуальний контроль	VT
10	Віброакустичний	VA

Як показано в роботі [35], оперативне отримання інформації про напружено-деформований стан металу в конструкціях в навантаженому і розвантаженому станах дає коерцитивна сила (рис 2.2), розподіл якої, отримано за допомогою приладу КРМ-Ц-К2М [36] (рис. 2.3).

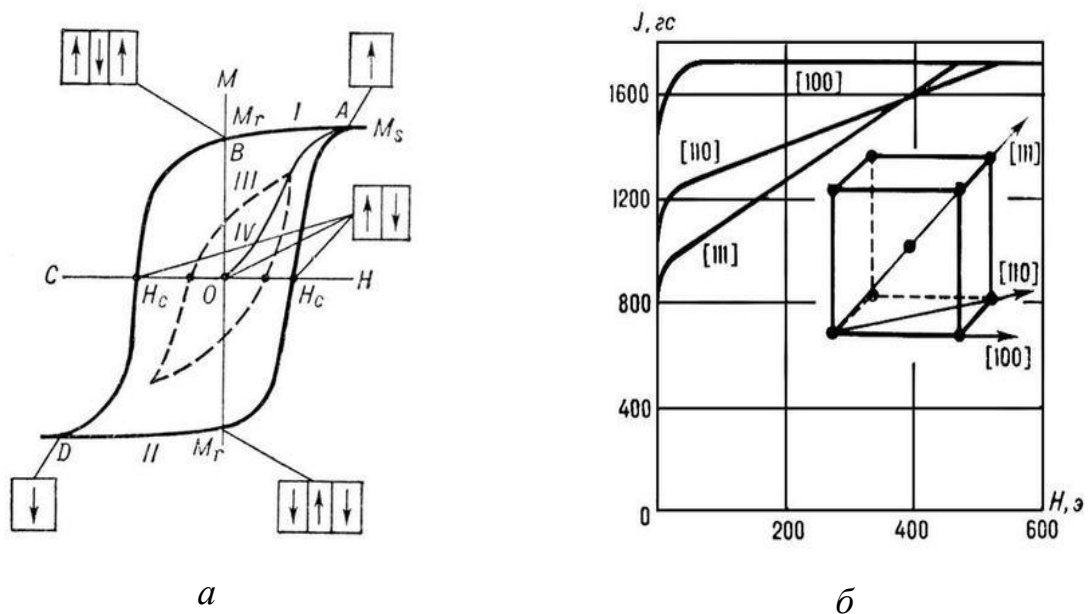


Рис. 2.2 Петля магнітного гістерезису\* для феромагнетику – а і криві намагнічування трьох головних кристалографічних осей монокристалів заліза – б

\*Н – напруженість магнітного поля; М – магнітний момент зразка; Нс – коерцитивна сила; Mr – залишковий магнітний момент; Ms – магнітний момент насичення.



Рис. 2.3 Магнітний структуроскоп серії КРМ-Ц-К2М для визначення коерцитивної сили

В основі контролю по коерцитивній силі діючих в сталевих конструкціях одноосьових напружень лежить магнітострикційний зв'язок між прикладеними напруженнями і зміщенням доменних меж. В області пружних напружень найбільшу чутливість до *розтягуючих* напружень має коерцитивна сила, виміряна *перпендикулярно* до напрямку прикладання навантаження. При цьому з *ростом* розтягуючих навантажень коерцитивна сила, виміряна в даному напрямку, *падає*. Напруження *стиснення* викликають найбільші зміни коерцитивної, виміряної *уздовж* прикладання навантаження. Зі збільшенням *стискаючого* навантаження коерцитивна сила *вздовж* цього напрямку *зростає*.

Тому одновісні *напруження розтягнення* контролюють за величиною коерцитивної сили, яка вимірюється *перпендикулярно напрямку розтягування*, а одновісні *напруження стиснення* – за величиною коерцитивної сили, яка вимірюється *вздовж напрямку стиску*.

Як було показано в [37], з ростом навантаження в зразках з конструкційної сталі має місце лінійна кореляція між величиною коерцитивної сили  $H_c$  і деформацією, що добре узгоджується з даними [38]:

$$H_c = H_c^0 + A\varepsilon, \text{ де:} \quad (2.1)$$

$\varepsilon$  – залишкова деформація;

$H_c^0$  – коерцитивна сила матеріалу зразка перед випробуванням;

A – коефіцієнт, що залежить від хімічного складу сталі.

У загальному випадку коерцитивну силу можна представити як суму складових, обумовлених кристалографічною магнітною анізотропією  $H_C^k$ , суть якої показано на рис.2.2, б, внутрішніми пружними напруженнями  $H_C^\sigma$ , що виникають при наявності дефектів кристалічної решітки і подрібненням кристалів і їх подовженістю  $H_C^N$  [39]:

$$H_C = H_C^k + H_C^\sigma + H_C^N = a \frac{K_1}{\mu_0 I_S} + b \frac{\lambda_S \sigma}{\mu_0 I_S} + c |N_b - N_a| I_S, \text{ де:} \quad (2.2)$$

$a, b, c$  – числові коефіцієнти;

$K_1$  – константа магнітної анізотропії;

$\mu_0$  – магнітна постійна;

$I_S$  – намагніченість насичення;

$\lambda_S$  – магнітострикція насичення;

$\sigma$  – внутрішні пружні напруження;

$N_a$  – коефіцієнт розмагнічування в напрямку головної осі частинки у формі еліпсоїда;

$N_b$  – коефіцієнт розмагнічування в будь-якому перпендикулярному головної осі напрямку;

$H_C^N$  – відповідає сильно витягнутій частці.

Широке застосування в даному дослідженні знайшли ультразвукові товщиноміри, ТУЗ-2 і УТ-04 ЕМА (рис. 2.4), які прості у виконанні і доступні в обігу.

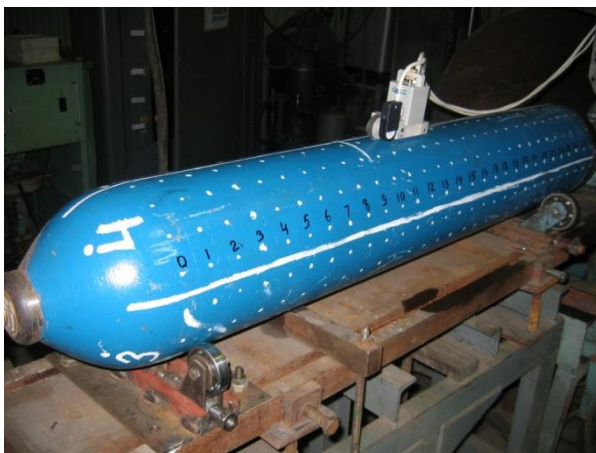


*a*



*б*

Рис. 2.4 Вимірювання фактичної товщини стінки кисневих балонів  
ультразвуковим товщиноміром ТУЗ-2 – *а*, ультразвуковим товщиноміром з  
перетворювачем УТ-04 ЕМА – *б*



*б*



*з*

Рис. 2.4 Вимірювання фактичної товщини стінки кисневих балонів :  
нанесення координатної сітки – *б*, балони для дослідження – *з*.

Принципова схема роботи приладів показана на рис. 2.5. Електронний блок виробляє: формування високовольтного зондуєчого імпульсу для збудження ПЕП; посилення сигналу з виходу ПЕП; математичну обробку отриманої вимірювальної інформації; зберігання змінних і проміжних результатів вимірювань; індикацію результатів вимірювання безпосередньо в одиницях товщини. ОЗУ – оперативний запам'ятовуючий пристрій постійної пам'яті, основне призначення якого є зберігання результатів вимірювань. Вимірювач часових інтервалів (ВЧІ) призначений для формування паралельного коду, відповідного часу поширення УЗК від однієї поверхні оболонки до іншої. ВЧІ містить вимірювальний тригер, який запускається зондуєчим імпульсом. Під час наявності імпульсу вимірювального тригера лічильник проводить підрахунок числа імпульсів генератора, відповідно до якого мікропроцесор виробляє розрахунок товщини контрольованих виробів. Блок живлення (БЖ) містить акумулятори та перетворювач-стабілізатор напруги.

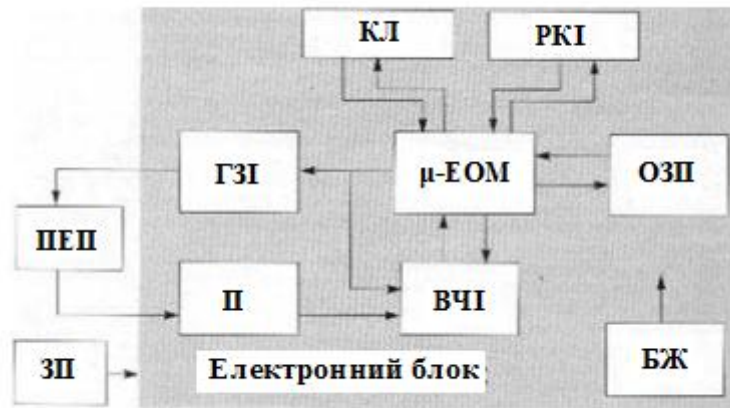


Рис. 2.5 Структурна схема товщиномірів

КЛ – клавіатура, РКІ – рідкокристалічний індикатор; ГЗІ – генератор зондуючих імпульсів, ПЕП – перетворювач,  $\mu$ -ЕОМ – мікро-ЕОМ, ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій, П – підсилювач, ВЧІ – вимірювач часових інтервалів, БЖ – блок живлення, ЗП – зарядний пристрій.

## 2.2.2 Механічні випробування зразків металу

До характеристик матеріалу відносяться механічні властивості, які характеризують здатність матеріалів чинити опір дії зовнішніх сил. До основних механічних властивостей відносяться міцність, твердість, ударна в'язкість, пружність, пластичність, крихкість і ін.<sup>i</sup>

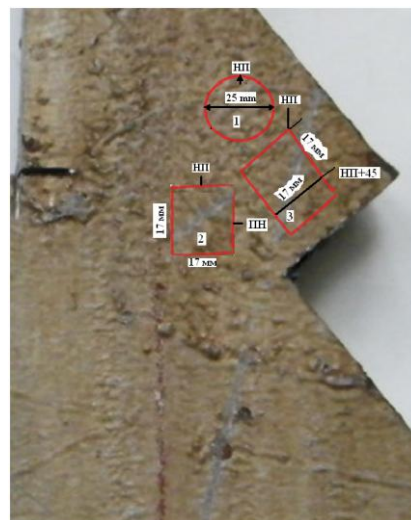
### 2.2.2.1 Проведення випробувань на статичну міцність

Короткочасні випробування циліндричних і плоских зразків на одновісний розтяг (рис.2.6, а) були виконані при кімнатній температурі на випробувальній установці Instron 8802 (рис. 2.7) згідно ГОСТ 1497-84.[40] Швидкість переміщення рухомого захвату машини 10,0 мм/хв.





а



б

Рис. 2.6 Розкрій фрагменту обичайки для отримання зразків з: механічних випробувань – а і визначення кристалографічної текстури\*– б.

\*1 – кубик 10×10×10 мм із зазначенням НП і ПН, 2 – циліндр 24 мм із зазначенням НП і ПН.



а



б

Рис. 2.7 Випробувальна установка Instron 8802: загальний вид – а, розташування зразка при випробуваннях – б.

#### 2.2.2.2 Методика проведення ударних випробувань зразків Шарпі

Випробування на ударний вигин проведено згідно зі стандартом ISO 14556-2000 у діапазоні температур  $-120...+80^{\circ}\text{C}$  на вертикальному інструментальному копрі (рис. 2.8), спроектованому і виготовленому в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України [41]. Вертикальний копер має ряд переваг у

порівнянні зі стандартним маятниковим копром, зокрема дозволяє легше варіювати швидкість, а відповідно і енергію удару.

При проведенні експериментів зразок Шарпі встановлюється на опору 12. Тяга баби фіксується в замковій частині 15 траверси. За допомогою електричної талі (на малюнку не показана) траверса із закріпленою бабою піднімається на висоту, що задається умовами експерименту. Висота  $h$  підняття баби визначає її швидкість  $V_0$  в момент удару відповідно до співвідношення:

$$V_0 = \sqrt{2gh}, \quad (2.3)$$

де:  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння.

Енергія  $E_0$ , накопичена бабою при падінні, визначається у відповідності з виразом:

$$E_0 = \frac{mV_0^2}{2} = mgh, \quad (2.4)$$

де:  $m$  – маса баби.

Даний копер має бабу вагою 240 Н, що забезпечує енергію в момент удару  $E_0 = 300 \text{ Дж}$  при швидкості удару  $V_0 = 5 \text{ м/с}$ . Для поглинання залишкової енергії баби служать амортизатори 14.

Ударник, а саме його робоча частина, була виконана відповідно до стандарту ISO 14556 [42]. У верхній його частині прорізані канавки для вимірювального кабелю. Матеріал ударника був підданий до загартування до твердості HRC 45. Конструкція опори і ударника показана на рис. 2.9.

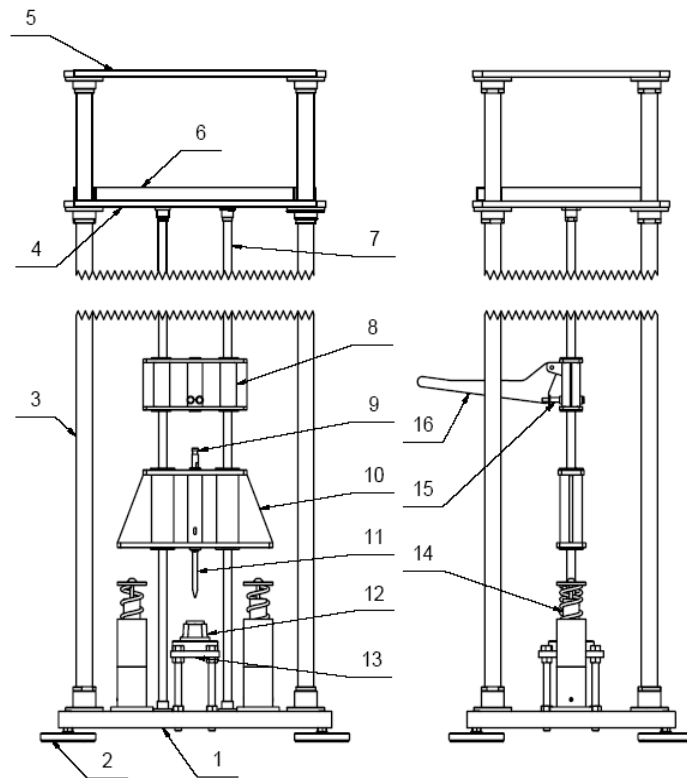


Рис. 2.8 Схема вертикального копра: 1 – основа; 2 – опора; 3 – стійка; 4 – плита жорсткості; 5 – верхня плита жорсткості; 6 – ребро жорсткості; 7 – напрямна; 8 – траверса; 9 – тяга баби; 10 – баба; 11 – ударник; 12 – опора зі зразком; 13 – стіл опори; 14 – амортизатор; 15 – замок; 16 – ручка скидання.

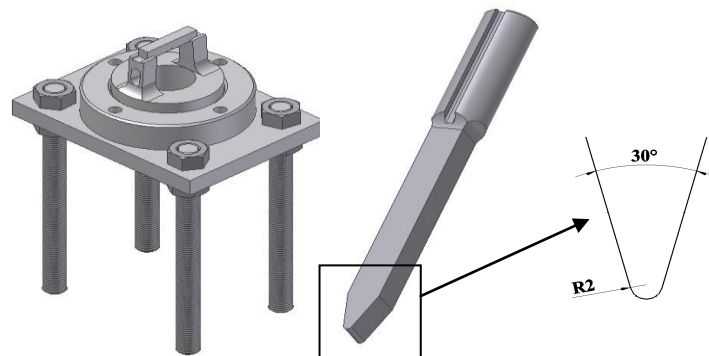


Рис.2.9 Конструкція опори і ударника вертикального копра (зі збільшенням показана вершина ударника)

Конструкція вертикального копра дозволяє проводити випробування як на стандартних зразках Шарпі, так і на малорозмірних зразках, а також – як при низьких, так і при високих температурах.



Для визначення параметрів навантаження зразка була розроблена багатоканальна система високошвидкісної реєстрації деформації і температури [43, 44]. На рис. 2.10 приведена схема реєстрації даних при випробуваннях з використанням такої системи. Для визначення силових параметрів навантаження на ножі наклеювалися тензодатчики. Інформація про зусилля на ножі через блок посилення, плату аналого-цифрового перетворювача (АЦП) подається в персональний комп'ютер для подальшого зберігання, обробки і аналізу.

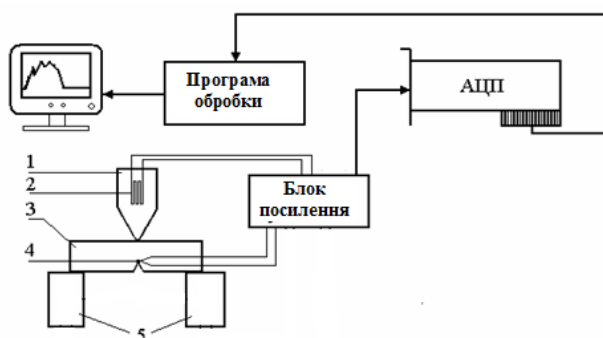


Рис. 2.10 Схема реєстрації даних при випробуваннях зразків на ударний трьохточковий згин: 1 – ніж копра, 2 – тензодатчик, 3 – зразок, 4 – термопара, 5 – опори копра

Оснащення копрів апаратурою з вимірювальними і реєструючими пристроями дає можливість збільшити обсяг інформації про поведінку матеріалів при ударному навантаженні.

Основним результатом таких випробувань є залежність зусилля від часу ударного навантаження. На підставі таких діаграм визначається повна енергія деформування і руйнування зразка. Діаграми зусилля-час для різних сталей і при різних температурах випробування можуть сильно відрізнятися, навіть якщо енергії деформування і руйнування ідентичні. Залежно від зміни характеру руйнування на діаграмі зусилля-час виділяються характерні ділянки. Це дозволяє отримати більше інформації про особливості деформування і руйнування зразків.

### 2.2.3 Визначення хімічного складу металу

*Хімічний склад* металу фрагментів визначено спектральним методом на приладі Спектровак–1000 виробництва фірми «Baird» і на рентген-флуоресцентному спектрометрі СЕР-01 «Elvax Light» та аналізаторі вуглецю ГОУ-1.

### 2.2.4 Металографічні дослідження мікроструктури

Зразки для *металографічних досліджень* були виготовлені з поздовжніх і поперечних шліфів, перпендикулярних товщині стінки балона а також з поперечного перерізу представлених фрагментів дротів, за стандартною методикою із застосуванням алмазних паст різної дисперсності.

Для виявлення структури мікрошліфи піддавалися хімічному травленню в 4% розчині азотної кислоти. Перегляд неметалічних включень і мікроструктур здійснювали на мікроскопі NEOPHOT-32 в діапазоні збільшень  $\times 200 \dots \times 1000$  зі застосуванням цифрової фотокамери OLYMPUS. Твердість по Віккерсу при навантаженні 100 Г було виміряне на мікротвердомірі М-400 фірми LECO.

### 2.2.5 Фрактографічні дослідження поверхні зламів

На відміну від стандартного визначення частки в'язкого або крихкого ділянок при збільшенні  $\times 100$  оптичного мікроскопа, використання растрової електронної мікроскопії (РЕМ) при збільшенні до  $\times 10000$  дозволяє більш точно встановити частку елементів мікроструктури.

Вивчення морфології зламів проводили за допомогою растрового електронного мікроскопа JSM-840(JEOL, Японія) в режимі вторинних (SEI) і оберненорозсіяних (BEI) електронів. Використання режиму BEI було обумовлено тим, що для дослідження зразків в цьому режимі немає необхідності проводити їх травлення з метою виявлення мікроструктури. Контраст зображення в даному режимі обумовлений різницею в хімічному складі структурних складових. Дослідження проводилися при збільшеннях  $\times 10 \div \times 1000$  і прискорювальній напрузі 20кВ.

Склад окремих елементів зламів проводили за допомогою енергодисперсійного спектрометра Link 860/500 "Link Systems", що дозволяє визначати хімічний склад елементів починаючи з 11 номера (Na) періодичної таблиці елементів. Тому фази, що містять "легкі" елементи O, H і C, на жаль, не визначалися. Для визначення складу фаз аналіз проводився в точці.

Хімічний склад фаз проводився за допомогою програми ZAF-4/FLS. Особливістю даної програми аналізу є те, що вона під час підрахунку змісту елементів враховує поправки, які необхідно внести на  $Z$  – атомний номер обумовленого елемента,  $A$  – адсорбцію і  $F$  – флюоресценцію.

За допомогою плати захоплення зображення MicroCapture електронне зображення поверхні досліджуваних зламів передавалося на екран комп'ютера з подальшою оцифруванням і запам'ятовуванням його в цифровому вигляді. Перевівши електронне зображення в кольорове, програма Image Pro дозволяє досить точно визначити частку кожної ділянки: крихкого, в'язкого і квазіскола.

Крім того, додатково фрактографічні дослідження експлуатаційних зламів і зламів після випробування на розтяг при кімнатній температурі проводили на стереоскопічному оптичному мікроскопі МБС-10 зі спеціальною насадкою. Перед фрактографічними дослідженнями експлуатаційних зламів їх очищали від продуктів корозії в ультразвуковому диспергаторі УЗДН з використанням 2% спиртового розчину щавлевої кислоти з інгібітором і наступним промиванням у петролейному ефірі. Однак з огляду на сильну забрудненість пошкодженого фрагмента повністю очистити поверхню зламів від артефактів не представляється можливим.

### 2.2.6 Кристалографічні дослідження текстури

Текстура в полікристалах, як відомо, являє собою безперервний розподіл кристалів по орієнтаціям (рис. 2.11), згідно до рівняння Вульфа-Брегга [47]:

$$n\lambda = 2d_{hkl} \times \sin\theta$$

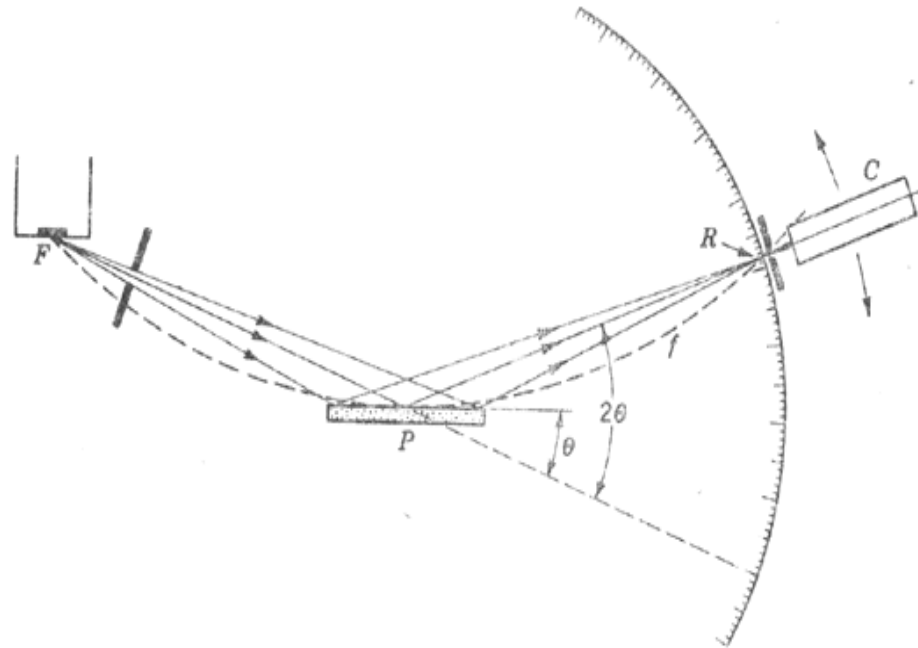


Рис. 2.11 Визначення кристалографічних орієнтувань в металі:  $\lambda$  – довжина хвилі рентгенівського випромінювання,  $d_{hkl}$  – міжплощинна відстань,  $\theta$  – кут дифракції (кут між падаючим променем і атомної площиною  $hkl$ ),  $F$  – фокальна пляма;  $f$  – фокальна окружність;  $R$  – приймальня щілина;  $C$  – лічильник.

При цьому спостерігаються певні переважні орієнтації кристалів, які для наочності прийнято описувати за допомогою ідеальних орієнтувань. При позначенні ідеальних орієнтувань  $\{hkl\} \langle uvw \rangle$  в циліндричному зразку мається на увазі, що сімейство площин  $\{hkl\}$  розташоване в площині, дотичній до циліндричної поверхні, а сукупність кристалографічних напрямків  $\langle uvw \rangle$ , що належать  $\{hkl\}$ , паралельні осі циліндра.

Для того щоб показати, які системи ковзання діють в кристалі при даній орієнтації осі розтягування, необхідно знати кутові співвідношення між напрямком, площиною ковзання і віссю розтягування. Щоб визначити орієнтацію площин і напрямків ковзання в кристалі необхідно знати орієнтування кристала. Для цього будують стереографічну проекцію. Вона є геометричною побудовою на площині, в якій зберігаються і можуть бути виміряні кутові співвідношення між площинами в кристалі (рис. 2.12).

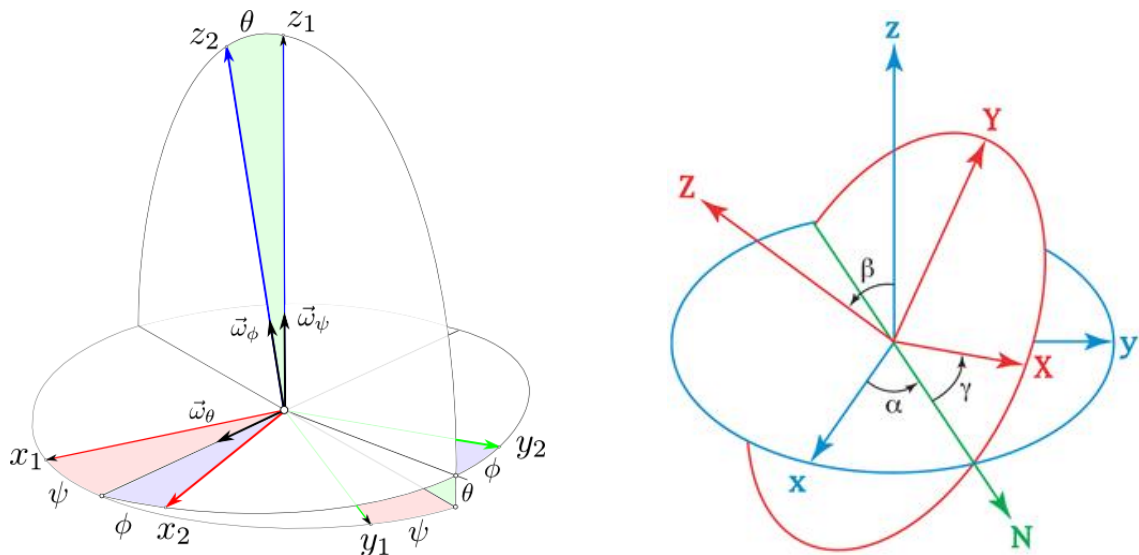


Рис. 2.12 Кути Ейлера визначають три повороти системи, які дозволяють привести будь-яке положення системи до поточного

Важливі компоненти текстури прокатки низьколегованої сталі розташовані уздовж трьох волокон (fibre) орієнтації:

- 1)  $\alpha$ -fibre – вісь волокна  $\langle 110 \rangle$  розташована паралельно напрямку прокатки, включаючи головні компоненти  $\{001\} \langle 110 \rangle$ ,  $\{112\} \langle 110 \rangle$ , і  $\{111\} \langle 110 \rangle$ .
- 2)  $\gamma$ -fibre – вісь волокна  $\langle 111 \rangle$  паралельна нормальному напрямку, включаючи головні компоненти  $\{111\} \langle 110 \rangle$  і  $\{111\} \langle 112 \rangle$ .
- 3)  $\epsilon$ -fibre – вісь волокна  $\langle 110 \rangle$  паралельна поперечному напрямку, включаючи головні компоненти  $\{001\} \langle 110 \rangle$ ,  $\{111\} \langle 112 \rangle$ ,  $\{554\} \langle 225 \rangle$  і  $\{011\} \langle 100 \rangle$ .

Дослідження *кристалографічної текстури* рентгенівським методом з побудовою обернених полюсних фігур (ОПФ) [48] виконували шляхом вимірювання інтегральних інтенсивностей дифракційних рефлексів від кристалографічних площин 110; 200; 211; 220; 310; 222; 321; 400; 330 зразків і еталона, виготовленого з дрібних рекристалізованих ошукрок сталі.

Зразки і еталон піддавали  $\theta$ – $2\theta$ -скануванню на дифрактометрі ДРОН-3 за методом Брегга-Брентано, зіставляючи інтегральні інтенсивності їх дифракційних ліній. Полусна густина пропорційна інтенсивності лінії ( $hkl$ ) у текстурованому зразку і без текстури:

$$P_{hkl} = \frac{I_{hkl}^T}{I_{hkl}^0} K, \quad (2.5)$$

де:

$$K = \frac{1}{\sum_{\Delta} A_{hkl} I_{hkl}^T / I_{hkl}^0}, \quad \sum_{\Delta} A_{hkl} = 1. \quad (2.6)$$

Таким чином,

$$P_{hkl} = \frac{I_{hkl}^T / I_{hkl}^0}{\sum_{\Delta} A_{hkl} I_{hkl}^T / I_{hkl}^0}, \text{ де:}$$

$I_{hkl}^T$ ,  $I_{hkl}^0$  – інтегральна інтенсивність лінії  $\{hkl\}$  у текстурованому і не текстурованому зразках.

Значення коефіцієнтів  $A_{hkl}$  для ОЦК – решітки наведені в Таблиці 2.3

Таблиця 2.3

**Коефіцієнти нормування для розрахунку  $P_{hkl}$  ОПФ [49]**

$hkl$	$A_{hkl}$	$hkl$	$A_{hkl}$
110	0,126	310	0,270
200	0,052	222	0,074
211	0,109	321	0,370

Нормували отримані співвідношення за методикою Моріса [50]. При цьому для збільшення точності інтегральні інтенсивності дифракції від площин першого та вищих порядків, наприклад, від (110) і (220), обчислювали як середнє арифметичне.

Це означає, що паралельно площині прокатки листа розташовуються, в основному, кристалографічні площини з індексами Міллера сімейства  $\{001\}$ , при цьому кристалографічні напрямки з індексами Міллера  $\langle 110 \rangle$ , що лежать в зазначеній вище кристалографічних площинах сімейства  $\{001\}$ , паралельні напрямку прокатки (НП). У той же час паралельно площині прокатки, але з меншою ймовірністю, розташовуються також кристалографічні площини  $\{112\}$  і  $\{111\}$  з кристалографічними напрямками  $\langle 110 \rangle$ , що лежать в цих площинах,

що розташовуються паралельно (НП). Інтенсивність вищеописаної текстури збільшується при наближенні до середини листа по товщині.

Відомо, що в металах і сплавах, які мають ОЦК кристалічну решітку, кристалографічні площини сімейства  $\{001\}$  є основними площинами відколу. Якщо вони складають основну компоненту текстури сталі, то вона сприятиме протіканню процесів шарувато-крихкого руйнування або розшарування листів паралельно площині прокатки при додатку напружень, перпендикулярних площині прокатки (нормальних напружень). Така ситуація може розвиватися, наприклад, при виготовленні з таких листів обичайок шляхом вигину вихідних зразків (рис.2.6, б).

### **2.3 Розробка алгоритму для оцінки структурно-текстурного стану матеріалу, заснованого на його фрактальних характеристиках**

Як відомо, аналіз структури металів є трудомістким процесом і вимагає комплексного підходу, який полягає в поєднанні традиційних методів оцінки якісних характеристик металів з новими методами оцінки їх структури [51].

Аналіз застосування фрактального методу у інших галузях, таких як фізика твердого тіла; пристрої та методи експериментальної фізики та матеріалознавство; синтез фрактальної розмірності і властивостей матеріалів [52]; моделювання середовища для дослідження фрактального об'єкту; тощо, показав, що використання цього методу викликає ряд складнощів, які саме наштовхнули на створення програми та застосування її до експерименту.

Суть проблеми полягає в наступному:

1. Набір квадратів (комірок) різних розмірів потрібно малювати від руки, або засобами програм які забезпечують малювання сітки в основі з квадратами;
2. Друкування на прозорому або півпрозорому папері;
3. Накладання на роздрукований лист із певною поверхнею та рахування кількості заповнених квадратів сітки.

Такі маніпуляції мають повторюватись від сітки з квадратами великого масштабу до накладання сітки з мінімальним розміром квадратів. Це може

зайняти день, два, три, навіть місяць, в залежності від розміру досліджуваної поверхні.

Отже, переваги програмного забезпечення:

1. Швидкодія подібних маніпуляцій.
2. Відсутня втрата пікселів на зображенні поверхні, яка може виникати під час роздруківки поверхні, або за рахунок похибки людського фактору.
3. Більш висока точність результату дослідження.

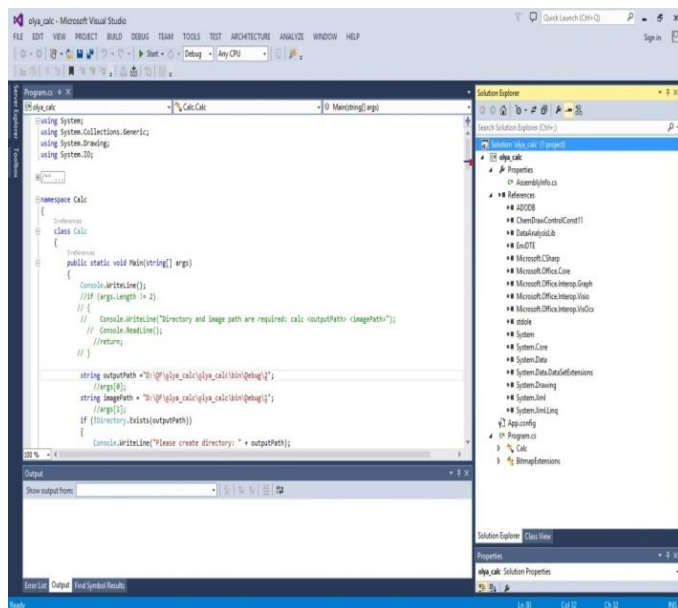
Але існують також певні складності програми для нового користувача:

1. Щоб працювати з програмою, досліднику потрібні знання з програмування, в ідеалі з мови на якій написана програма (C#);
2. Потрібно використовувати певне середовище для розробки програми для попереднього налаштування її (VisualStudio);
3. Якщо встановлено середовище і мова програмування, можуть виникнути багато ще запитань і проблем з налаштуванням: (бібліотеки це певні шматки програми, які надаються користувачу від середовища) для коректного оброблення зображення.

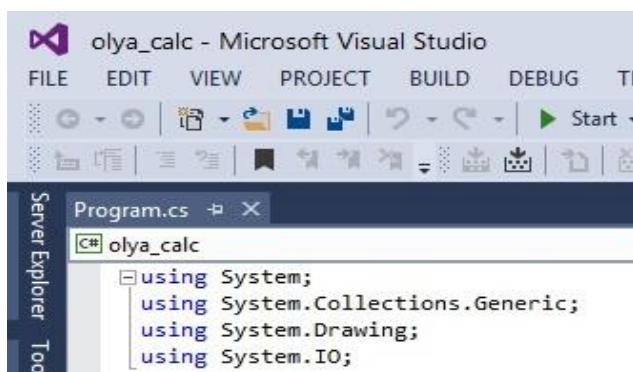
Наприклад, основна помилка яка може виникнути, це відсутність бібліотеки *Drawing*, підключення всіх бібліотек: робиться через налаштування середовища.

- по-друге, наступна помилка яка може виникнути, це завдання шляху до зображення. Програма має звідкись брати зображення і саме задача користувача – покласти зображення у власноруч створену папку <outputPath>

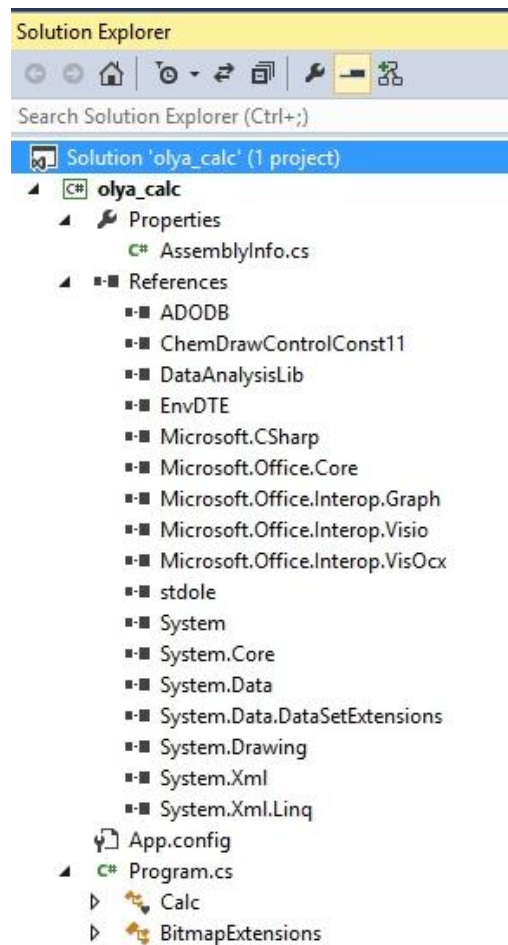




a



б



в

Рис. 2.13 Програмні налаштування коду

біля створеного після перевірки коду програми файлу типу olya\_calc.exe, вихідні матеріали будуть завантажуватись програмою у папку <imagePath>, яка має бути створена в тому ж каталозі, що і outputPath.

Якщо все це налаштоване, інших проблем виникати не повинно.

Існує один недолік програми, але на дане дослідження він не впливає – програма працює лише з чорно білим спектром.

Як працює програма:

1. Вмикаються всі необхідні налаштування середовища;

2. Якщо текст програми перевірений на помилки і вона пройшла перевірку, створюється exe файл з яким надалі ми працюватимемо.
3. У папку outputpath завантажуюмо малюнок переважно чорно-білих відтінків.
4. Далі програмою перевіряється, чи створена папка з даними, чи є вміст у папці. Якщо папка відсутня, програма просить створити папку звідки брати данні і куди записувати результат.
5. Далі запускається процедура `publicstatic IDictionary <double, double> Bow Counting Dimension (Bitmapbw,...)`, яка використовує під процедури для побудови сітки на зображенні, та для підрахунку фрактальної розмірності зображення.  
Якщо зображення кольорове, програма просить завантажити чорно-біле зображення.
6. Кінцевий результат цих двох процедур записується у папці imagePath у вигляді картинки з графіком усереднення фрактальної величини зображення.

Для зручності використання програми з вище вказаними налаштуваннями, був створений зручний і простий інтерфейс Fractal.exe (рис. 2.14), який дозволяє користувачу з будь-якими знаннями програмування швидко підрахувати значення фрактальної розмірності будь якого зображення чорно-білого відтінку. Даний інтерфейс дозволяє вказати максимальний та мінімальний розміри квадратів, якими буде покриватися зображення, а також крок, з яким має змінюватись розмір квадрата.

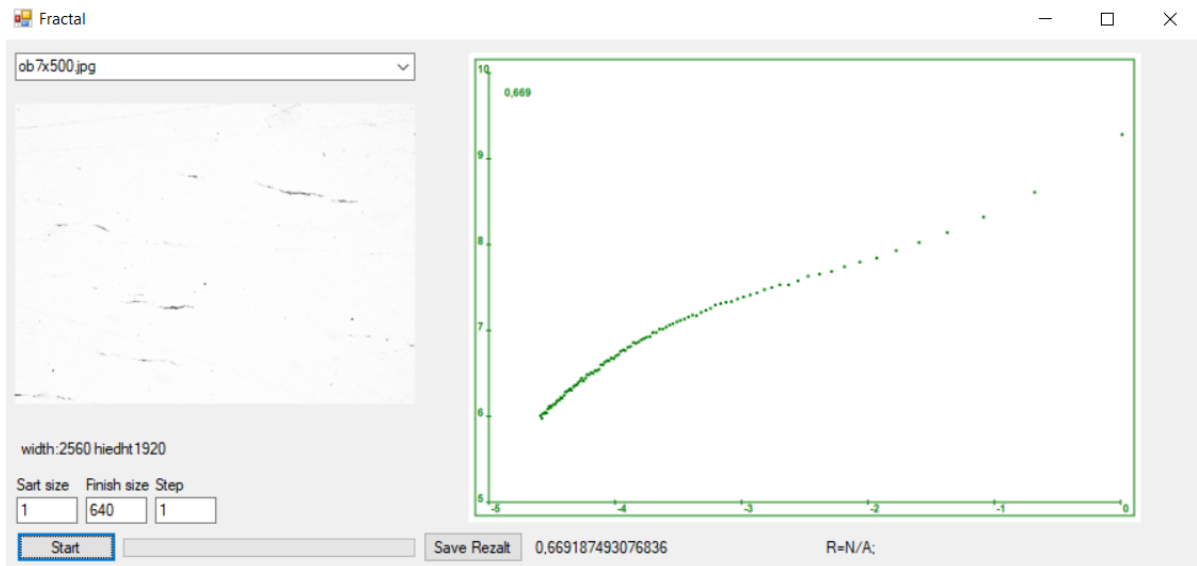


Рис.2.14 Інтерфейс програми підрахунку фрактальної розмірності

### 2.3.1 Процедура визначення фрактальної розмірності. Статистична обробка результатів вимірювань – оцінка похибок

Фрактальну розмірність  $D$  поверхні зламів визначали методом комірок (МК - box method) [53]. Для визначення фрактальної розмірності на зображення профілю обраного фрагменту зламу накладали елементарні квадратні сітки зі сторонами  $\ell_i$ . Підраховували число квадратів  $N(\ell_i)$ , які профільна крива перетинає. Змінюючи розмір вікна сітки  $\ell_i$  ( $2 \times 2$ ;  $1,5 \times 1,5$ ;  $1 \times 1$ ;  $0,5 \times 0,5$ ;  $0,25 \times 0,25$  cm), підраховували число квадратів, які крива профілю перетинає:  $N(\ell_2)$ ,  $N(\ell_3)$ , ...,  $N(\ell_n)$ . Кількість перетнутих квадратів  $N(\ell_i)$  і використаний розмір вікна сітки  $\ell_i$  визначають ФР  $D$ :

$$N(\lambda) \propto \lambda^{-D} \quad (2.7)$$

Практично ФР  $D$  визначали за тангенсом кута нахилу графічної залежності  $\lg$

$$N(\ell_i) = f(\lg \ell_i) [ ].$$

Фрактали поділяються на два класи: точні (Канторова безліч, крива Коха, сніжинка Коха, серветка, килим Серпінського і т.д.) і випадкові (броунівський рух).

Відповідно, в твердому тілі ми маємо справу з випадковими фракталами. Фрактальна розмірність буде нам показувати ступінь міцності об'єкта.

Щоб визначити розмірність  $D$  фрактальної множини розбивають весь  $n$ -мірний простір на маленькі кубики з довжиною ребра  $\varepsilon$  та об'ємом  $\varepsilon^n$ .

$N(\varepsilon)$  – мінімальне число квадратів, які в сукупності повністю покривають фрактальну множину, тоді:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(N(\varepsilon))}{\ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)} \quad (2.8)$$

Суть фрактального методу полягає в наступному: зображення зламу на мікрофотографії переводиться в формат `bitmap`, визначається центр мас скупчень дислокацій. Знайдена точка буде початком нашого відліку, потім мікрофото розбивається на квадрати і методом комп'ютерного аналізу визначається число елементарних об'єктів всередині кожного квадрата. Далі аналізується залежність числа мікрооб'єктів від розмірів квадратів.

Якщо об'єкт є монофракталом, то число мікрооб'єктів всередині заданого квадрата повинно залежати від лінійних розмірів:

$$N = b \cdot a^D, \text{ де } N - \text{число мікрооб'єктів всередині квадрата}$$

---

$a$  – лінійні розміри квадрата,

$b$  – коефіцієнт пропорційності, в загальному випадку залежить від вибору фігури.

Для об'єкта, який є монофракталом  $D = \text{const}$ , і відповідно:

$$\ln(N) = \ln(b) + D \cdot \ln(a)$$

При даній методиці спостерігається лінійна залежність функцій:

$$\ln(N) \text{ від } \ln(a).$$

Для подальшого аналізу корисно побудувати графік залежності числа мікрооб'єктів всередині квадрата від його лінійних розмірів в двічі логарифмованій шкалі. Якщо об'єкт є монофракталом, то графік буде мати лінійний вигляд, а тангенс кута нахилу до осі абсцис буде дорівнювати фрактальній розмірності всього об'єкта.

Таким чином, дана методика дозволяє відносно швидко з різною точністю (залежить від розмірів квадратів) визначити характеристику матеріалу. З точки

зору фрактальної геометрії, якщо  $1 < D < 2$ , то досліджуваний об'єкт з високим ступенем точності має самоподібну структуру, тобто функція розподілу по поверхні зламу (в об'єкті) не суттєво залежить від розмірів обраних ділянок.

### **2.3.2 Вдосконалення методики фрактальних досліджень поверхні руйнування. Реконструкція тривимірної картини зламу, отриманої в скануючому електронному мікроскопі**

Одним з перспективних напрямків моделювання складних систем, до яких відноситься структура металу, є використання методу мультифрактальної динаміки [54]. В даний час теорії фракталів і мультифракталів широко використовуються для опису властивостей самоподібності і складного скейлінга (масштабна інваріантність), які спостерігаються в самих різних фізичних ситуаціях. Самі різні об'єкти природи можуть бути віднесені до спеціального класу "мультифракталів", досить складно знайти область науки, в якій відсутні представники цього класу.

Структура випадкових фракталів на малих масштабах не є точно ідентичною всьому об'єкту, але їх статистичні характеристики збігаються.

Для кількісного опису фракталів достатньо однієї величини - фрактальної розмірності або параметра, що описує збереженість статистичних характеристик при зміні масштабу [55]. Мультифрактали – це більш складні об'єкти, для повного опису яких потрібно не одна, а цілий спектр фрактальних розмірностей (можливо навіть нескінченний). Фактично, мультифрактальний підхід означає, що досліджуваний об'єкт якимось чином можна розділити на вкладені фрагменти (підмножини), для кожного з яких спостерігаються свої властивості самоподібності [56].

Проблема оцінки структури і якісних характеристик металів вирішується протягом значного періоду часу методами і засобами фізики твердого тіла, механіки, хімії, матеріалознавства та інших наукових дисциплін.

Причина цього полягає в тому, що сам по собі аналіз структури і оцінка якісних характеристик металів є трудомістким процесом і вимагає

комплексного підходу, полягає в поєднанні традиційних методів оцінки якісних характеристик металів з новими методами оцінки їх структури [57].

Аналіз традиційних методів аналізів таких як електронна та оптична мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз, кількісна металографія свідчить, що жоден з них не може бути універсальним і придатним для вирішення повного обсягу завдань ідентифікації якісних характеристик металу шляхом аналізу його структури.

Розглянемо структуру зламу металу. Традиційний спосіб визначення розмірності полягає в тому, що досліджуваний об'єкт покривається сіткою з комітками розміром  $\mu$  і підраховується кількість коміток сітки  $\alpha(\mu)$ , що покривають досліджуваний об'єкт. Зі зменшенням розміру  $\mu$  комітки сітки, кількість коміток  $\alpha(\mu)$ , що покривають об'єкт, збільшується. Ємнісна (фрактальна) розмірність об'єкта визначається, як:

$$D = - \lim_{\mu \rightarrow 0} \frac{\lg \alpha(\mu)}{\lg (\mu)} \quad (2.9).$$

На перший погляд, завдання досить нескладне, якщо метод розділення на комітки застосовувати до більш елементарних структур, наприклад:

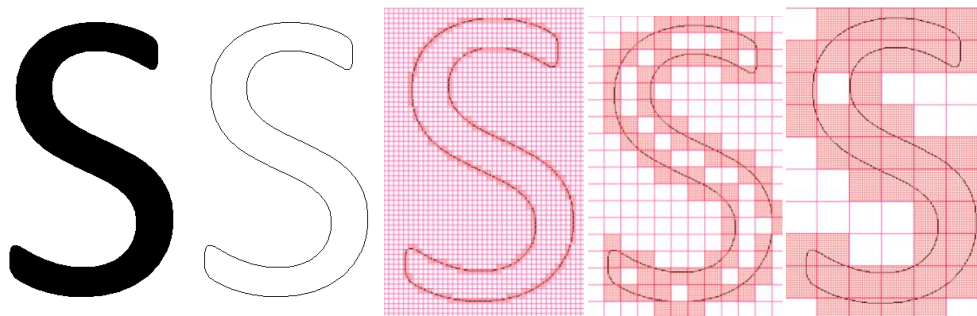


Рис.2.15 Візуалізація процедури накладання квадратів різного розміру на просте зображення.

Обчислимо розмірність Мінковського [58], яка має так само іншу назву – и box-counting dimension. Візьмемо деяку обмежену множину в метричному просторі, наприклад чорно-білу картинку, намалюємо на ній рівномірну сітку певного розміру  $\mu$ , і закрасимо ті комітки сітки, які містять хоча б один елемент шуканого множини. Далі почнемо зменшувати розмір коміток, тобто  $\mu$  тоді розмірність Мінковського буде обчислюватися за вищенаведеною формулою

(2.9), досліджуючи швидкість зміни ставлення логарифмів. У підсумку, отримуємо залежність (рис. 2.16).

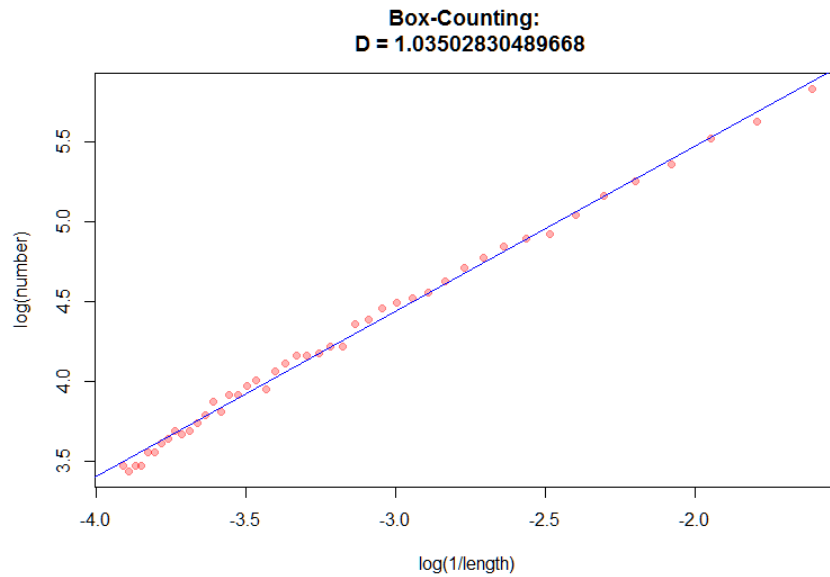
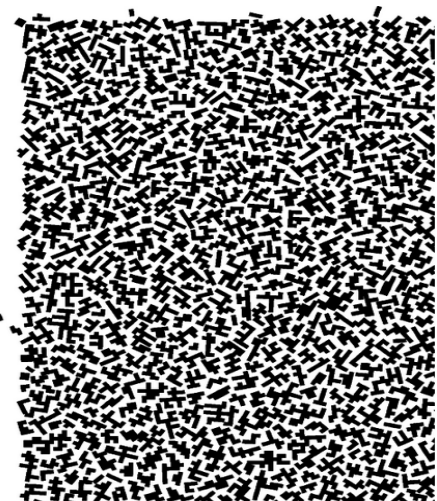


Рис. 2.16 Графік залежності логарифмів, кутовий коефіцієнт якого визначає фрактальну розмірність всього об'єкта.

Якщо поглянемо на мікрофото зламу [59], завдання набагато ускладниться лише тим, що зображення має не зовсім точні межі. Відповідно застосування програми підрахунку методом комірок видаватиме вельми не точний результат. Виходом із ситуації може бути перетворенням експериментального зображення в модельоване (рис. 2.17).



а



б

Рис. 2.17. Фотографія зламу – а; перетворене контрастне зображення фотографії мікрозламу - б



### 2.3.3 Розробка програмного супроводу для застосування фрактального методу щодо оцінки структурних параметрів матеріалу

Обчислення фрактальної розмірності відбувається в кілька етапів, для початку необхідно визначитись який критерій підрахунку нас цікавить, то може бути інформаційні границі зерен або інформаційні міжзеренні області. Після визначення інформаційної складової починаємо працювати з зображенням (рис 2.18 а). Програма підраховує всі темні пік селі, отже, якщо нас цікавлять границі зерен, то зображення для підрахунку фрактальної розмірності необхідно підготувати – виконати процес інверсії вихідного зображення (рис 2.18 б) і для більшої точності збільшити контраст (рис 2.18 в).

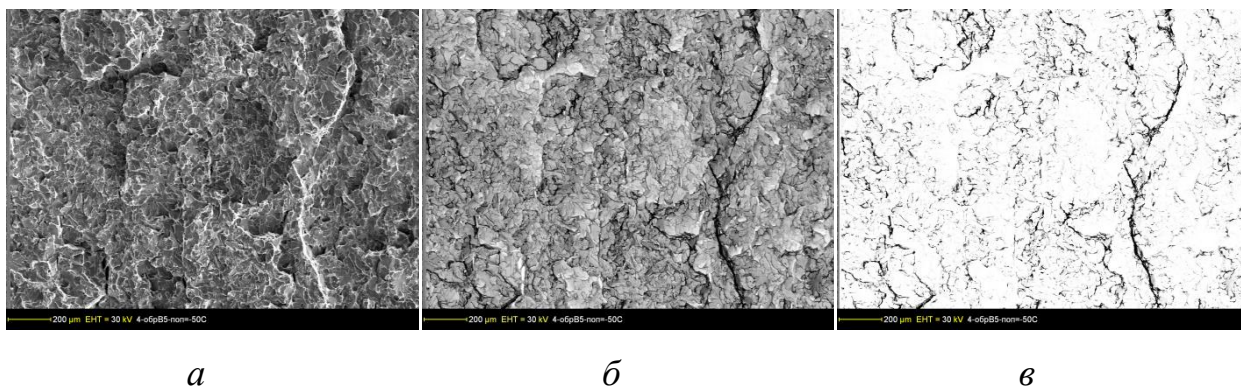


Рис. 2.18 Інформаційні границі зображення: вихідне зображення мікроструктури – *a*; інверсійне зображення мікроструктури – *б*; підвищена контрастність зображення для спрощеного підрахунку – *в*

Для розбивки зображення на квадрати, використовується дві процедури, написані на мові (C #) СіШарп [60], які допомагають покрити зображення квадратами і потім підрахувати розмірність за формулою (2.8).

У нульовому елементі вихідного вектора міститься кутовий коефіцієнт (це і буде шукана розмірність), а в наступному елементі - зміщення. І власне ключова функція, яка повертає данні, за яким необхідно обчислити кутовий коефіцієнт.

Зв'язок двох процедур у Додатку 1.

Отримані результати виводяться у інтерфейс та записуються у відповідну папку для подальшої роботи з ними.



## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Описані механічні випробування, на зразках яких буде підраховуватись фрактальна розмірність і відбуватися пошук взаємозв'язків механічних характеристик і фрактальних розмірностей;
2. На основі методу фрактального аналізу встановлено можливість обчислення кількісних критеріїв структурної неоднорідності зламу;
3. Розроблено і описано програмний супровід для оперативного виконання завдань дослідження.

**Результати експериментальних досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:**

1. Штофель О.А., Рабкіна М.Д. Использование мультифрактального анализа для оценки свойств конструкционных сталей. *Universum: Технические науки: электрон. Научн. Журн.* 2016. – №10(31) ISSN:2311-5122 (eLIBRARY.RU, EBSCO Discovery, GoogleScholar)
2. Штофель О.О. Застосування методу фрактального аналізу до вивчення структури металу. *Науково технічний журнал МЕТАЛОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МЕТАЛІВ*, 2019 - Том 91, No. 3, сс. 40-46.
3. Штофель О. А. Метод фрактального анализа для оценки структуры конструкционных сталей. – Харьков: XVI МНПК: «Развитие науки в XXI веке», 2016. – 120-122.
4. Рабкіна М.Д., Штофель О.О. Фрактальна природа тріщин при руйнуванні зварних з'єднань. – Київ: МК «Зварювання та споріднені технології - сьогодення і майбутнє», 2018 – с.77-78

### РОЗДІЛ 3 ВПЛИВ СТРУКТУРНИХ І МАГНІТНИХ ЧИННИКІВ НА ФРАКТАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХОНЬ РУЙНУВАННЯ

Здебільшого металеві вироби, зокрема елементи значної кількості конструкцій, мають полікристалічну структуру, яка – в процесі отримання – на визначеному етапі зазнає в тому чи іншому вигляді обробку тиском. Так, в наслідок прокату полікристалічна структура листових і трубчастих заготовок стає текстурованою, оскільки в різних зернах кристалографічні площини певного індексу в більшості орієнтуються паралельно. Такі полікристали подібно до монокристалів, є анізотропними, тобто мають певну переважну кристалографічну орієнтацію. Наприклад, в ОЦК структурі при прокаті в основному формується головна компонента типу  $\{001\} \langle 110 \rangle$  з додатковими компонентами  $\{112\} \langle 110 \rangle + \{111\} \langle 110 \rangle$  [61].

Отже, структурна анізотропія і, відповідно, анізотропія механічних властивостей, в багатьох випадках виявляється одним з джерел руйнування прокату металу. Так, встановлено, що несприятлива кристалографічна орієнтація є головним чинником, відповідальним за шарувато-крихкі руйнування конструкцій, зокрема при експлуатації посудин тиску в водневих середовищах [62]. Залежності між опором руйнуванню і волокнистістю зламу показали, що визначення кристалографічних орієнтувань дозволяє прогнозувати в'язкість і характер руйнування матеріалу [63]. Однак вивчення субструктурних параметрів матеріалу прецизійними методами на невеличких зразках викликає суттєві труднощі. У той же час взаємозв'язок фрактальних особливостей і кристалографічних параметрів конструкційних матеріалів з показниками коерцитивної сили, яку можна визначати, не вдаючись до вирізання зразків, вивчена недостатньо. У зв'язку з цим доцільним виявляються дослідження, направлені на зіставлення структурних параметрів – кристалографічних і фрактальних – з магнітними характеристиками феритно-перлітних сталей, що дозволить більш повно використовувати інформацію результатів вимірювання коерцитивної сили, як неруйнівного методу контролю

для запобігання поширення тріщин, зокрема поверхневих, в конструкціях відповідального призначення.

Таким чином, в поточному розділі наведено результати систематичного комплексного аналізу, проведеного за допомогою неруйнівних методів контролю (розподіл коерцитивної сили в стінці посудини магнітним методом з визначенням товщини стінки ультразвуковим методом), а також – фізико-механічних методів досліджень (визначення кристалографічних орієнтацій і встановлення фрактальних розмірностей, в т.ч. поверхонь руйнування і прогнозування передбачуваного осередку руйнування) на прикладі значного ряду листових і трубчастих елементів.

### **3.1 Дослідження структурної неоднорідності в металі оболонок посудин тиску**

Вважається, що найбільш чутливим до структурної складової металу магнітним параметром, є коерцитивна сила  $H_c$ , яка значною мірою також залежить і від інших факторів, зокрема від товщини стінки конструкційних елементів  $t$ . Для отримання повної інформації щодо взаємозв'язку  $H_c$  і  $t$  найбільш придатними виявляються гідравлічні випробування посудин тиску. В якості таких об'єктів спочатку були обрані кисневі балони по ГОСТ949-73, ємністю 40 л на робочий тиск 14,7 МПа, по-перше, в силу їх невеликих розмірів. По-друге, оскільки випуск подібних посудин припинено на даний час, але ті, що залишилися в обігу, продовжують використовуватися, і тим більш викликають підвищену увагу з огляду на їх небезпечну експлуатацію. Об'єктивні дані, в тому числі, результати деяких досліджень після гідравлічних випробувань для з'ясування впливу товщини стінки на величину коерцитивної сили, а також – для вивчення структурно-текстурних параметрів металу, наведено в *Таблиці 3.1*.

Таблиця 3.1

## Об'єктивні дані і деякі параметри кисневих балонів після гідровипробувань

№	Зав. №	Термін експлуатації, рік	Товщина стілки, мм (min÷max)	НД*	Коерцити вна сила, А/см (min ÷ max)	Руйнівний тиск при гідро- випробуваннях, МПа	Фактичний запас міцності, т =Р <sub>руйн.</sub> /Р <sub>розр</sub>	Збільшення периметра збереженої частини балону, %
			до випробувань					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Б1	5	-	7,6÷8,6	+	6,0÷8,7	58,9	2,71	4,2
Б2	758	-	7,5÷9,8	+	5,4÷7,0	56,7	2,76	4,6
Б3	15365	-	7,3÷8.8	+	н/в	н/в	н/в	н/в
Б4	93636	18	6,9÷9,1	+	н/в	н/в	н/в	н/в
Б5	467838	19	8,2÷9,3	+	н/в	н/в	н/в	н/в
Б6	56607	21	6,8÷8,6	+	н/в	н/в	н/в	н/в
Б7	1345	22	7,6÷8,9	+	н/в	н/в	н/в	н/в
Б8	252557	27	8,0÷9,7	+	н/в	н/в	н/в	н/в
Б9	224582	28	7,4÷9,4	+	н/в	н/в	н/в	н/в
Б10	130503	30	7,2÷9,1	+	н/в	н/в	н/в	н/в
Б11	112671	35	<b>6,6</b> ÷8,3	–	н/в	н/в	н/в	н/в
Б12	116264	33	6,8÷8,7	+	н/в	н/в	н/в	н/в
Б13	115181	36	<b>6,0</b> ÷9,7	–	н/в	н/в	н/в	н/в
Б14	286897	36	8,0÷9,8	+	н/в	н/в	н/в	н/в
Б15	30013	48	<b>6,0</b> ÷10,8	–	н/в	н/в	н/в	н/в
Б16	269418	36	<b>6,6</b> ÷8,5	–	4,6÷8,3	48,3	2,91	4,0
Б17	89952	48	<b>6,1</b> ÷10,3	–	4,2÷7,7	н/в	н/в	н/в

Б18	91200	45	5,6÷9,0	–	6,0÷9,4	49,9	3,16	1,8*
Б19	86482	48	7,3÷8,9	+	4,7÷9,2	51,9	2,65	4,9
Б20	49607	49	7,4÷8,0	+	4,7÷6,9	47,3	2,50	4,7
Б21	147710	52	7,3÷9,2	+	4,3÷6,3	51,4	2,98	4,1
Б22	153737	56	7,8÷9,6	+	4,3÷7,1	49,3	2,11	1,8*
Б23	39280	18	4,5÷9,8	–	5,1÷7,8	55,1	2,45	1,6*
Б24	189154	45	7,5÷8,6	+	5,9÷7,7	н/в	н/в	н/в
Б25	3917	46	8,2÷9,4	+	4,8÷8,1	н/в	н/в	н/в
Б26	2063	57	7,9÷10,3	+	4,0÷5,2	н/в	н/в	н/в
Б27	129277	27	7,7÷10,4	+	5,8÷8,5	н/в	н/в	н/в
Б28	35601	56	7,4÷10,5	+	4,7÷9,1	н/в	н/в	н/в
Б29	117769	69	7,0÷9,9	+	4,8÷8,0	н/в	н/в	н/в

Примітка: \*НПАОП 0.00-1.07-94, п.10.2.18 – придатність до експлуатації (за товщиною стінки);

н/в – не випробувані

Для встановлення взаємозв'язку між величиною коерцитивної сили  $H_c$  – найбільш чутливим до структури магнітним параметром і товщиною стінки балону, на всю зовнішню поверхню балонів наносилася координатна сітка з кроком 50 мм. У вузлах цієї сітки були проведені заміри товщини оболонки ультразвуковими товщиномірами ТУЗ-2 і УТ-04 ЕМА, а коерцитивної сили – структуроскопом КРМ-Ц-К2М уздовж циліндра і в кільцевому напрямку. Обґрунтуванням вимірювання магнітних характеристик не менше ніж в двох напрямках є, як відомо, анізотропія структурних параметрів і відповідно – механічних властивостей металу оболонок.

### 3.1.1 Аналіз стану внутрішньої поверхні трубчастих конструкцій при визначенні товщини стінки

Перед гідравлічними випробуваннями кисневі балони були ідентифіковані, піддані огляду та обміру (Таблиця 3.1). При цьому на зовнішній поверхні були виявлені незначні дефекти, що не виключало появу нових дефектів при проведенні випробувань. Однак, в першу чергу, доцільно зупинитися на хімічному складі металу [64,65] після тривалого терміну експлуатації балонів. Аналіз отриманих результатів (Таблиця 3.2) підтверджує їх відповідність хімічним складам металу балонів зі сталі Дс (Таблиця 3.3), виготовлених в останні роки на ММК ім. Ілліча.

Таблиця 3.2

#### Хімічний склад металу досліджуваних балонів

№	Термін служби,р.	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	C экв.
Б1	-	0,54	1,10	0,330	0,022	0,023	0,11	0,10	0,72
Б2	-	0,49	0,85	0,280	0,023	0,022	0,14	0,11	0,63
Б16	36	0,44	0,90	0,366	0,014	0,017	0,11	0,11	0,62
Б18	45	0,51	1,01	0,319	0,023	0,023	0,14	0,11	0,72
Б19	48	0,44	0,91	0,394	0,025	0,019	0,10	0,08	0,62
Б20	49	0,48	0,72	0,257	0,026	0,019	0,10	0,08	0,63
Б21	52	0,47	0,85	0,247	0,023	0,022	0,11	0,07	0,64
Б22	56	0,50	0,93	0,380	0,025	0,020	0,11	0,08	0,65
Б23	18	0,49	0,88	0,255	0,019	0,026	0,23	0,10	0,69
ТУ14-157-15		0,43÷0,53	0,7÷1,0	0,17÷0,37	≤0,045	≤0,045	≤0,35	≤0,25	-

Це свідчить про те, що протягом багаторічної експлуатації істотних змін в складі сталі не відбулося. Вуглецевий еквівалент, який згідно DIN EN10025 розраховують за нижченаведеною формулою, в середньому залишається на рівні 0,62÷0,64 (табл. 3.2, 3.3):

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}.$$

Перевищення вуглецевим еквівалентом цього діапазону (Таблиця 3.2) при наявності інших чинників, зокрема зниження товщини стінки, може виявитися однією з причин переходу металу в крихкий стан (наприклад, Б18 і Б23, порівняно з Б1, Таблиця 3.1)

Таблиця 3.3

**Хімічний склад металу ряду балонів виготовлених на ММК ім. Ілліча**

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cu	Cr	A <sub>C1</sub>	A <sub>C3</sub>	C <sub>екв.</sub>
0,43	0,74	0,25	0,020	0,011	0,02	0,02	0,03	729,5	810,9	0,56
0,43	0,80	0,29	0,017	0,010	0,02	0,03	0,01	728,5	811,7	0,57
0,43	0,83	0,32	0,016	0,017	0,01	0,01	0,04	729,2	815,0	0,58
0,45	0,80	0,22	0,026	0,021	0,01	0,01	0,01	729,8	811,3	0,59
0,45	0,87	0,27	0,015	0,017	0,02	0,02	0,03	727,0	809,2	0,60
0,47	0,80	0,28	0,018	0,024	0,01	0,01	0,05	729,3	808,1	0,61
0,49	0,73	0,28	0,013	0,023	0,01	0,01	0,04	728,4	801,8	0,62
0,49	0,77	0,30	0,020	0,035	0,01	0,02	0,03	730,2	808,6	0,63
0,50	0,75	0,27	0,022	0,025	0,02	0,03	0,07	730,9	803,4	0,64
0,50	0,84	0,19	0,019	0,017	0,01	0,01	0,03	726,9	798,0	0,65
0,52	0,85	0,23	0,018	0,025	0,02	0,01	0,06	727,6	798,2	0,68
0,53	0,76	0,26	0,021	0,017	-	-	0,03	729,8	795,6	0,66
0,53	0,77	0,28	0,020	0,019	0,01	0,01	0,04	729,9	796,7	0,67

Повертаючись до наслідків відхилення товщини стінки від нормативних даних, *вперше* були проведені систематичні дослідження стосовно стану внутрішньої поверхні балонів за допомогою вимірювання товщини стінки [66]. Приймаючи за базу для відліку зовнішню поверхню, яка при експлуатації не піддається корозії, вимірюючи товщину стінки безперервно або дискретно в окремих точках, представилося можливим відобразити профіль внутрішньої

поверхні балона. Повнота відображення профілю і можливість виявлення змін, пов'язаних з корозією, залежали від кількості і частоти розміщення точок вимірювання. Вимірювання товщини, як відмічалось, проводилося на спеціалізованому стенді товщиноміром з перетворювачем УТ-04 ЕМА, встановленим на візку з датчиком шляху. Стенд було оснащено приводом, як для безперервного переміщення візка, так із зупинками, при яких проводилося вимірювання у ручному режимі. Зазор між перетворювачем і поверхнею балона не перевищував 0,5 мм. При вимірах не допускалось наявності забруднень і різного роду інших нерівностей зовнішньої поверхні, які могли б порушити роботу перетворювача товщиноміра.

Отже товщина циліндричної стінки балона була виміряна в 448 точках, рівномірно розміщених на зовнішній поверхні (рис. 2.4). Результати вимірювань по кожному балону були збережені в пам'яті товщиноміра, а потім, за допомогою програми, перетворені в зручний для практичного використання вид.

Виміри показали, що товщина стінок змінюється в широких межах незалежно від терміну служби балону (*Таблиця 3.1, к.4*). Як можна бачити, значний розкид результатів в сукупності з заниженими показниками, спостерігається в наступних об'єктах: Б11, Б13, Б15÷Б18, Б23. Відповідно фіксується і їх непридатність до експлуатації (*Таблиця 3.1, к.5*). Слід підкреслити, що на циліндричній розгортці, діаграми розподілу товщини стінки, які відображають стан внутрішньої поверхні балонів, в багатьох випадках мають специфічну форму, представленою витягнутими вздовж твірних характерними ділянками (рис. 3.1).

Таким чином, оцінка товщини стінки балонів за допомогою ультразвукового товщиноміра УТ-04 ЕМА (рис.2.5) *вперше* дала можливість отримати корисну інформацію щодо внутрішньої поверхні балонів і визначити потенційно небезпечні ділянки циліндричної стінки при тому, що допустима товщина стінки за ДСТУ, повинна бути не менше 6,8 мм.



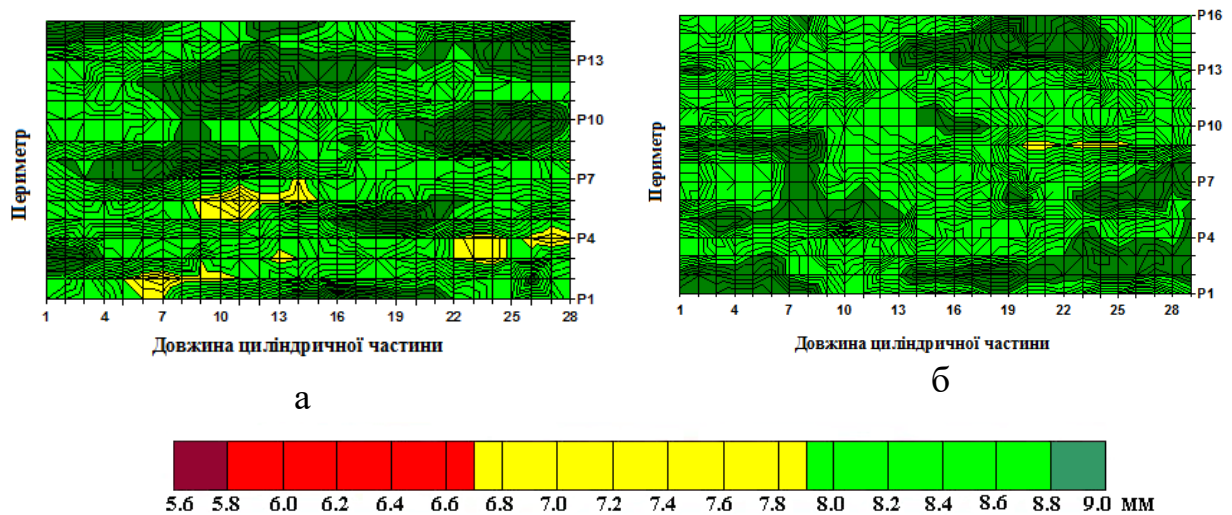


Рис. 3.1 Розподіл товщини стінки у вихідному стані в: Б2 – а; Б22 – б

### 3.1.2 Аналіз НДС металу при вимірюванні коерцитивної сили

Як відомо, оперативне отримання інформації щодо напружено-деформованого стану конструкцій в навантаженому і розвантаженому видах дає коерцитивна сила (рис 3.2).

За даними [67] для балонів зі сталі Дс, які відпрацювали 25...30 років, сформульовані наступні критерії оцінки стану:

- при коерцитивній силі, що дорівнює  $H_C < 8$  А/см балони можуть працювати без обмежень;
- при  $H_C = 8 \div 9,5$  А/см термін експлуатації повинен бути обмежений через накопичення пошкоджень;
- при  $H_C > 9,5$  А/см через ризик руйнування балони повинні бути виведені з експлуатації.

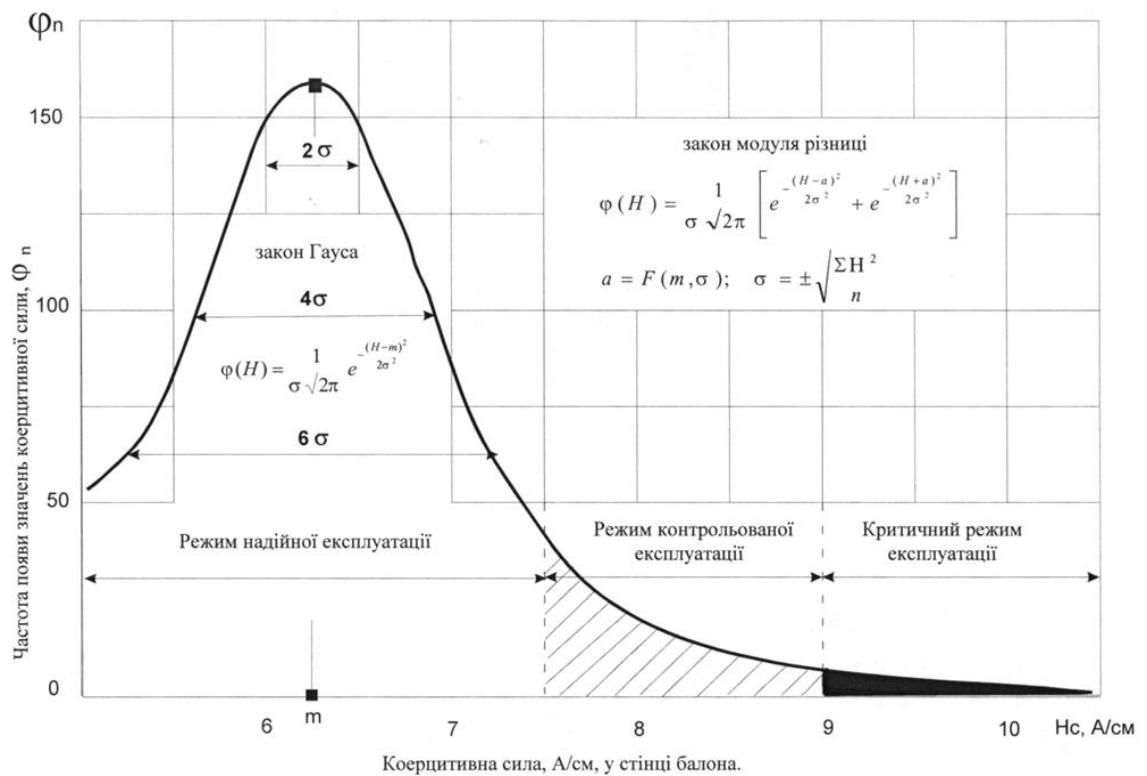


Рис. 3.2 Статистичний аналіз розподілу коерцитивної сили  $H_c$  в оболонках балонів, які відпрацювали понад 30 років і допущені до подальшої експлуатації після технічного діагностування

Отже для дослідження напружено-деформованого стану (НДС), на зовнішню поверхню кожного балону була нанесена, як відмічалось, координатна сітка  $40 \times 40$  мм, що складалася з 16 твірних з 28 точками для вимірювань, тобто всі результати проаналізовано з урахуванням даних отриманих при вимірюваннях товщини, так і коерцитивної сили на цих 448 ділянках (Таблиця, 3.1). Як можна спостерігати, розподіл НДС по виміру коерцитивної сили ( $H_c$ ) за допомогою КРМ-Ц-К2М (рис. 2.2), в поздовжньому і кільцевому напрямку має не однаковий характер (рис. 3.3). Подальші дослідження показали, що розподіл  $H_c$  в кожному напрямку також має специфічний характер. Так, поля нерівномірних значень  $H_c$ , як і в випадку розподілу товщини, розташовані в основному у вигляді витягнутих ділянок вздовж подовжньої осі циліндричної частини балону (рис. 3.4), що свідчить про роль текстурно-структурної складової у формуванні напружено-деформованого стану ще на стадії отримання заготовок. При цьому термін експлуатації об'єктів, як і в випадку хімічного складу, саме на *характер* розподілу коерцитивної сили

в стінках балонів не впливає, будь-то незадіяні, як, наприклад Б1, чи використовувані на протязі 56 років, як наприклад Б22 (*Таблиця 3.1*). Але в самих витягнутих ділянках під час навантаження при гідровипробуваннях, як буде наведено нижче, простежуються зміни щодо їх рівня (рис. 3.4, *а* и 3.5, *б*).

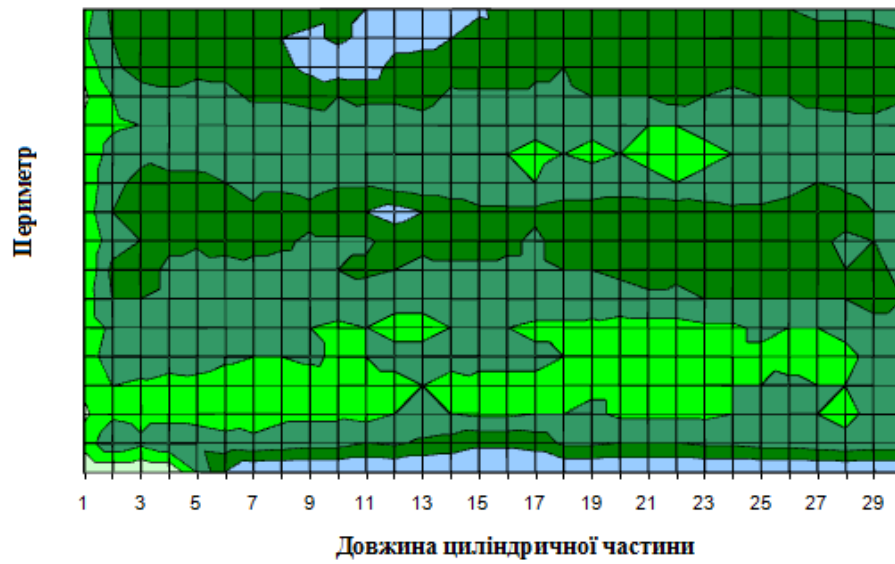
*Гідравлічне випробування* балонів проводилося на спеціальному стенді. Надмірний тиск в балонах зі швидкістю не більше 50 кгс/см<sup>2</sup> за 1 сек. створювався гідроагрегатом «Hofer» при контролі тиску манометром і датчиком тиску «Метран 100-ДІ». Температура води підтримувалась в межах + 5°C ÷ + 40 °C.

Слід зауважити, що в процесі гідровипробувань заміри коерцитивної сили в балонах здійснювали як в початковому стані (рис. 3.4, *б* и 3.5, *а*), так і при зупинках навантаження (рис. 3.4, *а* и 3.5, *б*), також і після руйнування (рис. 3.5, *в* и 3.6).

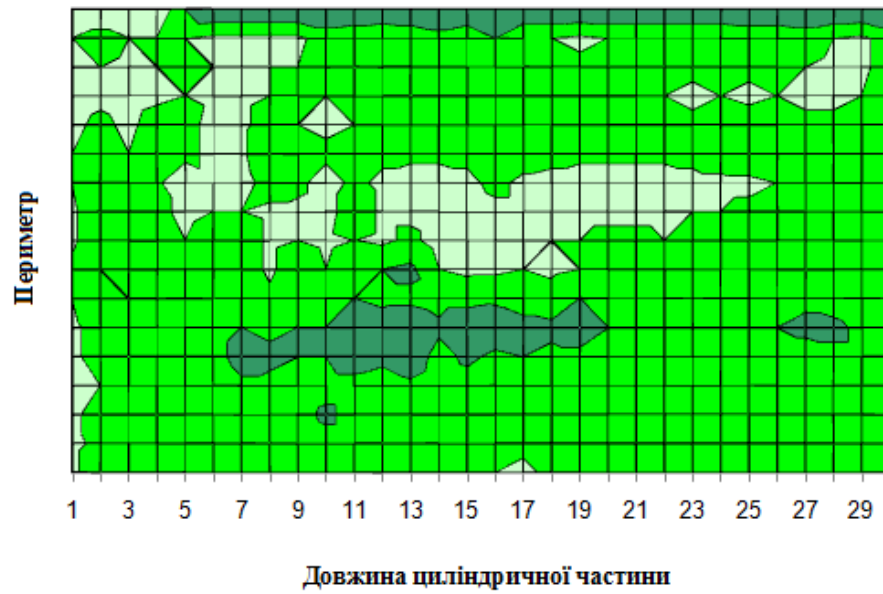
Отже, у процесі навантаження на зупинках і після руйнування вимірювалися:

- розподіл коерцитивної сили в циліндричній стінці по досягненню пластичного деформування;
- розподіл коерцитивної сили в зруйнованій циліндричній стінці;
- периметр циліндричної частини балону далеко від місця руйнування.

Так, у Б1 перед випробуваннями було встановлено, що на відміну від решти поверхні ділянка між твірними 13 і 15 має найбільшу коерцитивну силу (7,7 А/см) і найменшу товщину стінки (7,5 мм), що було сигналом для звернення уваги на його деформування під час випробування саме на цьому місці. Спостереження показали, що, виходячи з інтенсивності збільшення коерцитивної сили (9,0÷9,2 А/см) при досягненні тиску 42,0 МПа (рис. 3.4, *а*), на цій ділянці також більш активно відбувалося деформування балону, яке закінчилося при тиску 58,9МПа (Б1, *Таблиця 3.1*). У незруйнованій частині балону периметр збільшився на 4,2%. Фактичний запас міцності  $m = P_{\text{руйн.}}/P_{\text{розр.}}$  складає – 2,71 (*Таблиця 3.1*).



*a*



*б*

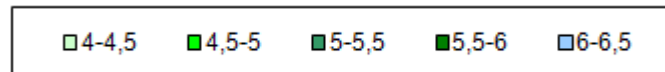


Рис. 3.3 Розподіл коерцитивної сили в Б21 у напрямках:  
 поздовжньому – *a* і кільцевому – *б*

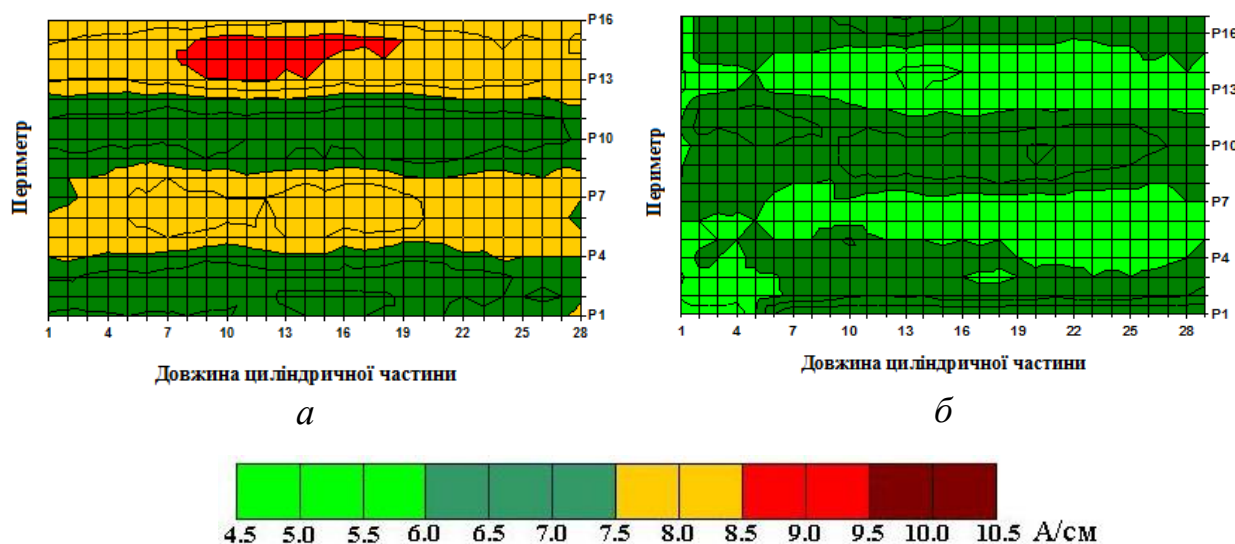


Рис. 3.4 Розподіл коерцитивної сили в поздовжньому напрямку в:

Б1 після досягнення тиску 42,0 МПа – *а*; Б22 у вихідному стані – *б*

В той же час, в Б2, який характеризується розподілом значень товщини  $7,5 \div 9,4$  при середньому значенні 8,5 мм і коерцитивної сили  $5,4 \div 7,0$  А/см (Таблиця 3.1), що свідчить о достатньо високому рівні якісних показників, за якими він надходить від виробника в експлуатацію, виявлена ділянка з мінімальною товщиною  $7,5 \div 7,7$  мм (твірна Р6, рис. 3.1, *а*). В процесі навантаження балона саме вона стала місцем концентрації деформацій. При тиску 42,0 МПа, коли вся стінка піддалася до пластичного деформування, найбільша коерцитивна сила (9,6 А/см, яка вказує, що метал знаходиться в стані передруйнування), була зафіксована на ділянці поверхні, відповідній твірній Р6, де при тиску 56,7 МПа відбулося руйнування. Периметр балону далеко від зруйнованої ділянки збільшився на 4,6%. Фактичний запас міцності по відношенню до розрахункового робочого – 2,76. (Таблиця 3.1).

В металі циліндричної стінки Б19 також виявлено специфічний розподіл коерцитивної сили з двома чітко вираженими ділянками підвищених значень ( $6,0 \div 7,9$  А/см) між твірними Р5-Р6 і Р13-Р14 (рис. 3.5, *а*). Товщина стінки балону відповідала нормативним вимогам, тому технічний стан дозволяв експлуатувати балон при штатному навантаженні, але з обмеженням терміну служби в контрольованому режимі. В той же час на ділянках Р5-Р6 і Р13-Р14 з підвищеними значеннями коерцитивної сили товщина була найменша (7,3 мм).

Згідно [2] при цих значеннях коерцитивної сили має місце накопичення пошкоджень.

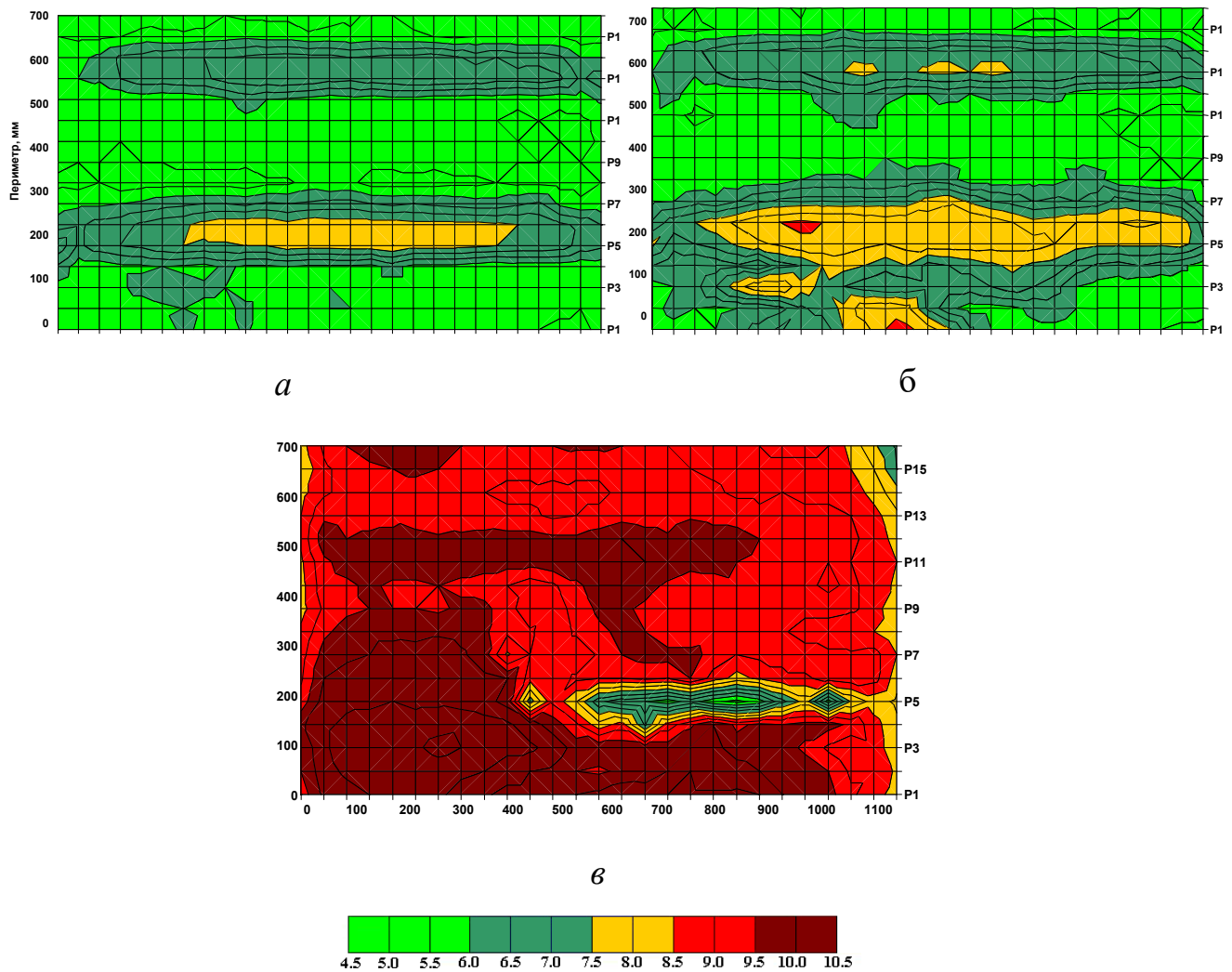


Рис. 3.5 Розподіл коерцитивної сили  $H_c$ , А/см в кільцевому напрямку Б19: в вихідному стані – *a*; після навантаження 32,5 МПа – *б*; після руйнування при навантаженні 51,9 МПа – *в*

*a**б**в**г*

Рис. 3.6 Загальний вид балонів після руйнування при гідравлічних випробуваннях: Б18 – *a*; Б19 – *б*; Б22 – *в*; Б23 – *г*

На першому етапі випробування балон був навантажений тиском  $P = 32,5$  МПа, що викликало початок пластичного деформування циліндричної стінки і зростання коерцитивної сили. Після скидання тиску відзначено збільшення значень коерцитивної сили до 8,5 А/см на ділянці між твірними Р5-Р6 (рис. 3.5, б). На цій же ділянці при тиску 51,9 МПа балон зруйнувався, а збільшення

периметра балону в збереженої частини склало 4,9% (*Таблиця 3.1*). За даними коерцитиметрії ( $H_C = 9,0 \div 10,5$  А/см, рис. 3.5, *в*) руйнування сталося при напругах, що відповідають межі міцності сталі Дс. Характер руйнування крихко-в'язкий (рис. 3.6, *б*). Виходячи з результатів гідровипробувань, руйнівний тиск перевищив розрахунковий робочий в 2,8 рази, а експлуатаційний – в 3,5 рази. Це згідно [68] дозволяло продовжити експлуатацію балона на обмежений термін.

Щодо Б22, розподіл коерцитивної сили у вихідному стані також характеризується витягнутими ділянками відносно загального фону, проте з меншими значеннями (рис. 3.4, *б*). Судячи по розкиду даних, як коерцитивної сили ( $4,3 \div 7,1$  А/см), так і товщини стінки ( $7,8 \div 9,6$  мм, *Таблиця 3.1*) при відсутності значної місцевої локалізації (рис. 3.1, *б*), все свідчило про те, що незважаючи на солідний стаж, він міг продовжувати експлуатацію без обмежень. У процесі навантаження при тиску, що відповідає текучості металу балона, порушень в розподілі коерцитивної сили відносно вихідного стану не спостерігалось. Коли вся стінка увійшла в стан плинності, при тиску 49,3 МПа (*Таблиця 3.1*) сталося руйнування балону на ділянці з товщиною стінки 8,5 мм, однак не по самому тонкому місцю. Збільшення периметра збереженої частини балону пройшло лише на 1,8%, а коерцитивна сила досягла лише  $8,0 \div 9,2$  А/см, що підтверджує передчасність руйнування. Метал зруйнувався крихко з ознакою в'язкості у поверхні (рис. 3.6, *в*). В той же час візуальним оглядом встановлено *розшарування* металу в приповерхневому шарі, що не фіксується структуроскопом, але, як відомо, служить причиною появи шарувато-крихких тріщин при незначному запасі міцності  $m = 2,11$  (*Таблиця 3.1*).

Таким чином, дослідження магнітних полів за допомогою коерцитиметра КРМ-Ц К2М надало можливість отримати інформацію щодо напружено-деформованого стану в металі балонів при проведенні гідравлічних випробувань.

Використовуючи данні таблиць 3.1 та 3.9 отримали залежності із фрактальної розмірністю. Показано, що товщина стінки посудини практично



не впливає на показники фрактальної розмірності. В той же час відмічається, що зміна коерцитивної сили і фактичного запасу міцності має схожий характер відносно фрактальної розмірності.

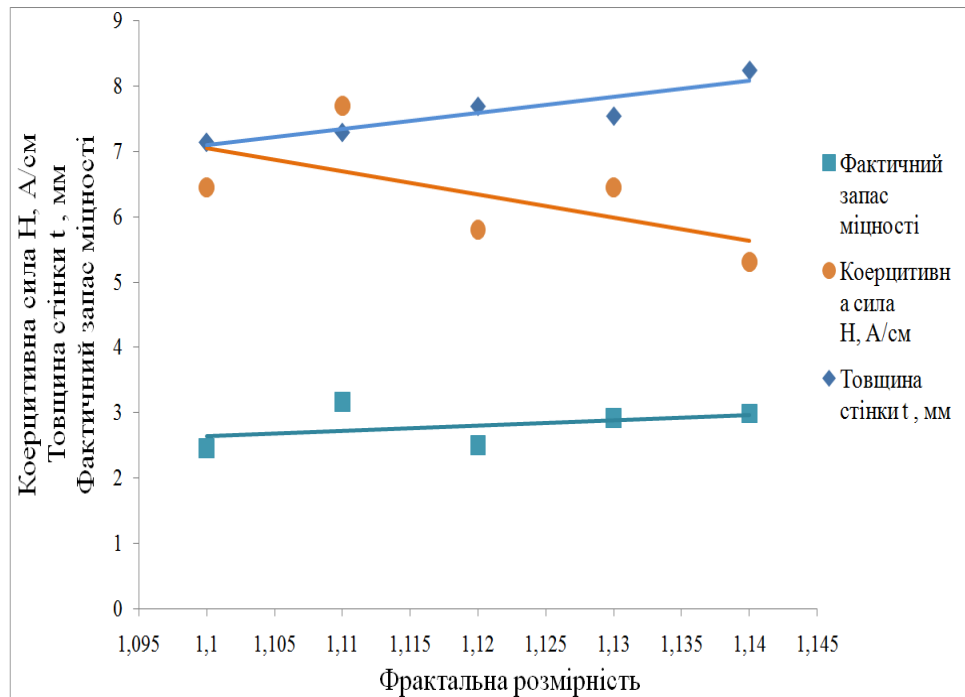


Рис. 3.7 Фрактальна розмірність, товщина стінки, коерцитивна сила і запас міцності

Таким чином, в подальшому передбачено використання фрактальної розмірності для оцінки характеристики матеріалу.

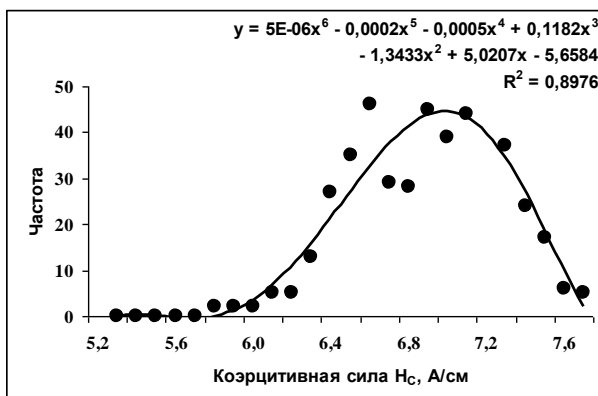
### 3.1.3 Оцінка кореляційних залежностей між коерцитивною силою і товщиною стінки конструкційних елементів

Як відмічалось, за характером розподілу і величиною коерцитивної сили (рис. 3.2) можна судити про режим експлуатації балонів: надійний (до 7,5 А/см); контрольований (7,5÷ 9 А/см) і критичний (вище 9 А/см), в той час як в нових балонах значення коерцитивної сили складають  $H_c = 4 \div 6$  А/см. При тому, як приведено на рис. 3.3, показники коерцитивної сили, виміряної вздовж циліндра дещо відрізняються від аналогічних результатів, отриманих в кільцевому напрямку. Вважається також, що зі збільшенням пластичної деформації коерцитивна сила, виміряна вздовж циліндра, істотно зростає, а виміряна в кільцевому напрямку, теж збільшується, але менше, ніж в першому випадку [69].

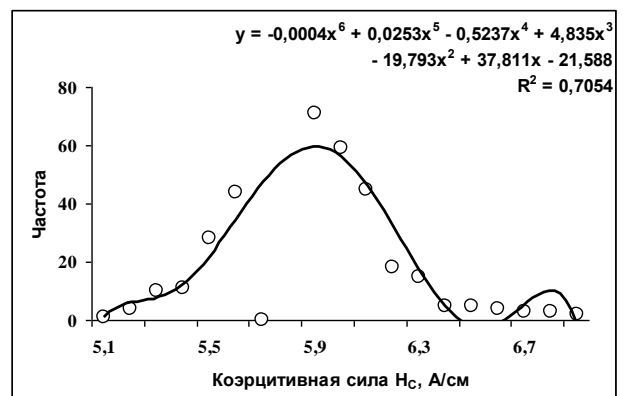
Наші дослідження показали, що в балонах після тривалої експлуатації значення коерцитивної сили переважно не перевищують контрольований поріг (Таблиця 3.1). Однак в ряді балонів виявлені локальні ділянки, що відповідають критичному режиму експлуатації. Так в Б18, в якому під час випробування хоч і досягнуто високого запасу міцності ( $m = 3,16$ , Таблиця 3.1), спостерігаються ділянки ( $100 \text{ см}^2$ ), з високими значеннями коерцитивної сили.

Статистичний аналіз даних, отриманих з 480-ти ділянок кожної циліндричної оболонки, показав, що розподіл коерцитивної сили в ній можна апроксимувати поліномом 6-го ступеня, як це показано, наприклад, на рис. 3.7. При цьому максимальній частоті в поздовжньому напрямку (рис. 3.7, а, в) відповідають більш високі значення коерцитивної сили, ніж в кільцевому (рис. 3.7, б, г).

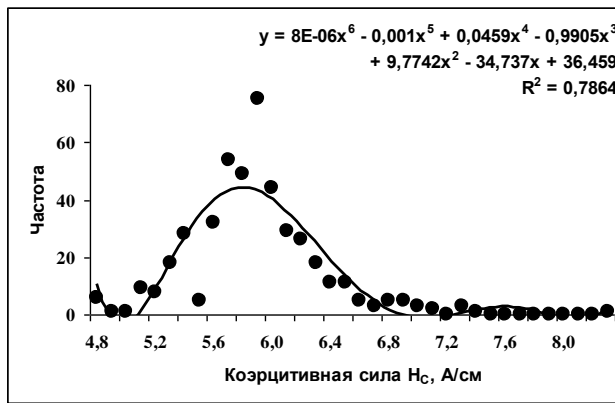
Таким чином, з огляду на те, що значення коерцитивної сили в нових балонах складають  $H_C = 4 \div 6 \text{ А/см}$ , а в стані передруйнування  $H_C \geq 9,5 \text{ А/см}$ , отримані результати свідчать про те, що при відсутності неприпустимих пошкоджень в стінках балонів, стан металу після тривалого терміну експлуатації в основному продовжує залишатися задовільним. Зіставлення даних товщинометрії і коерцитиметрії показало, що зі зменшенням товщини оболонки коерцитивна сила збільшується (рис. 3.8).



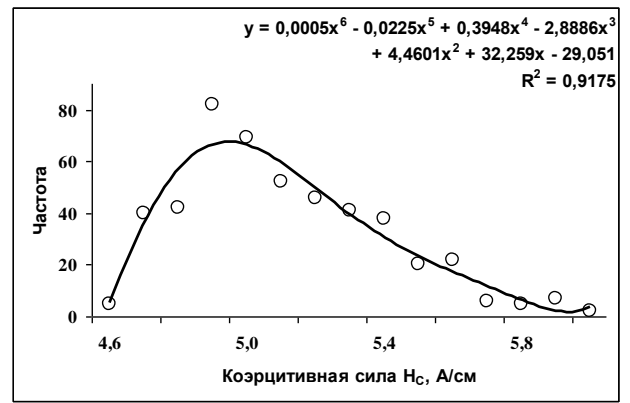
а



б



в

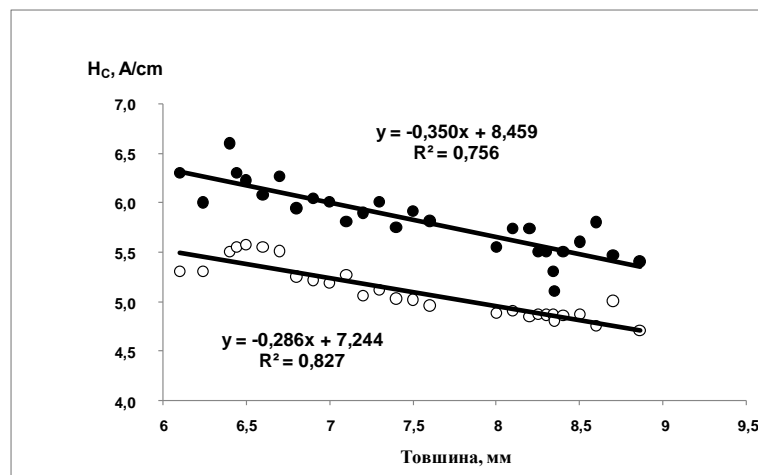


г

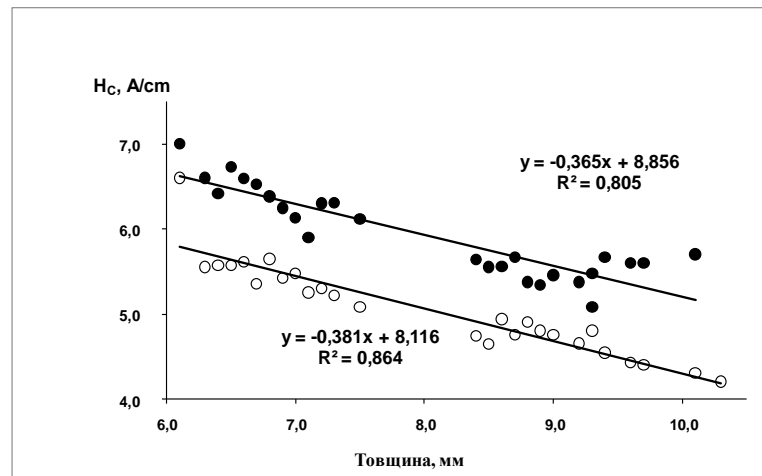
Рис. 3.8 Статистичний аналіз розподілу коерцитивної сили в оболонках:

Б23 (а, б); Б16 (в, г); поздовжній напрямок – а, в; кільцевий напрямок – б, г

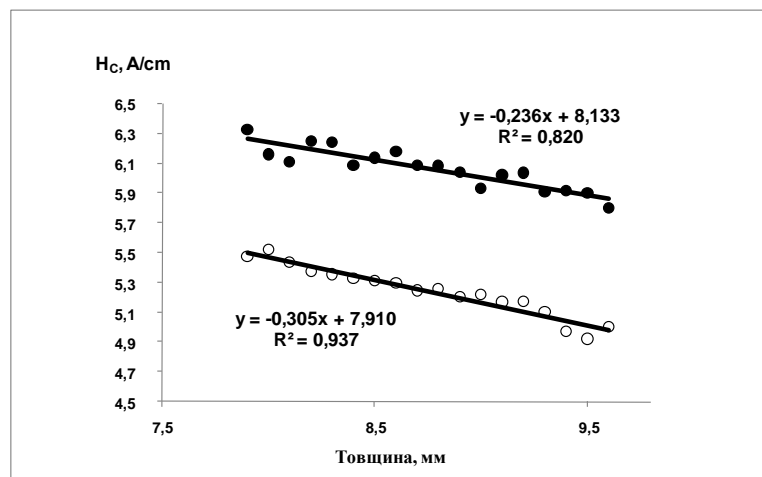
Підтвердженням встановленої закономірності може служити випробування аж до руйнування балону Б18 (рис. 3.6, а). Незважаючи на те, що балон, як зазначалося, показав високий запас міцності, місце руйнування було визначено до випробування, оскільки в результаті вимірів була виявлена ділянка з високою коерцитивної силою ( $9,3 \div 9,4$  А/см), якому відповідала мінімальна товщина стінки ( $5,6 \div 5,9$  мм).



а



б



в

Рис. 3.9 Вплив товщини стінки і напрямку вимірювання на показники  $H_c$  в: Б16 – а, Б17 – б, Б22 – в; поздовжній напрямок – темні точки, кільцевий напрямок світлі – точки.

Таким чином, зі збільшенням товщини стінки коерцитивна сила зменшується, а співвідношення між  $H_c$  ( $y$ ) і  $t$  ( $x$ ) в основному можна апроксимувати лінійною залежністю типу  $y = A x + B$ .

При цьому значення коерцитивної сили, виміряні в поздовжньому напрямку, лежать вище значень, виміряних в кільцевому напрямку, тобто, показники коерцитивної сили, виміряні в одних і тих же точках в осьовому і кільцевому напрямку, розташовуються евідистантно (рис. 3.8). Однак в ряді випадків лінійність порушується, що, по всій видимості, може бути обумовлено накопиченням втомних пошкоджень [70], особливостями напружено-

деформованого стану стінок балонів, а також структурними змінами в металі і вимагає подальшого вивчення. Отримані результати добре узгоджуються з висновками [71], де при збільшенні деформації – на підставі даних оптичної металографії і кристалографічної текстури – встановлена лінійна кореляція між коерцитивною силою  $H_c$  і структурно-текстурними параметрами.

Для розвитку цих уявлень із фрагментів ряду балонів були вирізані зразки для проведення металофізичних досліджень, включаючи аналіз структурних складових, кристалографічну текстуру, поверхню зламів, тощо.

### **3.1.4 Дослідження металографічної структури металу балонів**

Перш за все, доцільне розглянути мікроструктуру поперечного перерізу стінок балонів, які були в експлуатації значний термін. Так, в Б16 внутрішня і зовнішня поверхні пошкоджені загальною корозією.

Що стосується Б18, то з внутрішньої поверхні, крім загальної корозії спостерігається знеуглецьований шар, в якому відбувається зниження мікротвердості до  $HV_{0,1} 1810 \div 1930$  МПа в порівнянні з серединою товщини –  $HV_{0,1} 2210 \div 2280$  МПа. У меншій мірі піддається загальної корозії зовнішня поверхня Б18.

У Б20 (рис. 3.9, в) з внутрішньої поверхні найбільш значні пошкодження, проте, тут спостерігається підвищення мікротвердості до  $HV_{0,1} 2320 \div 2740$  МПа.

Пошкодження внутрішньої поверхні Б21 більш істотні порівняно з Б18. Крім того, характерною особливістю тут є знеуглецювання не тільки з внутрішньої, а й з зовнішньої поверхні, де відбувається зниження мікротвердості до  $HV_{0,1} 1470$  МПа, в порівнянні з серединою товщини –  $HV_{0,1} 1970 \div 2030$  МПа.

Щодо структури, в стінках балонів Б16, Б18 (рис. 3.9, а), Б20 (рис. 3.9, в) і Б21 структура по суті ідентична і являє собою феритно-перлітну суміш з балом зерна фериту №8 за шкалою [72] по всьому перерізу з деякою смугастістю, характерною для структури прокату біля внутрішньої поверхні балонів.

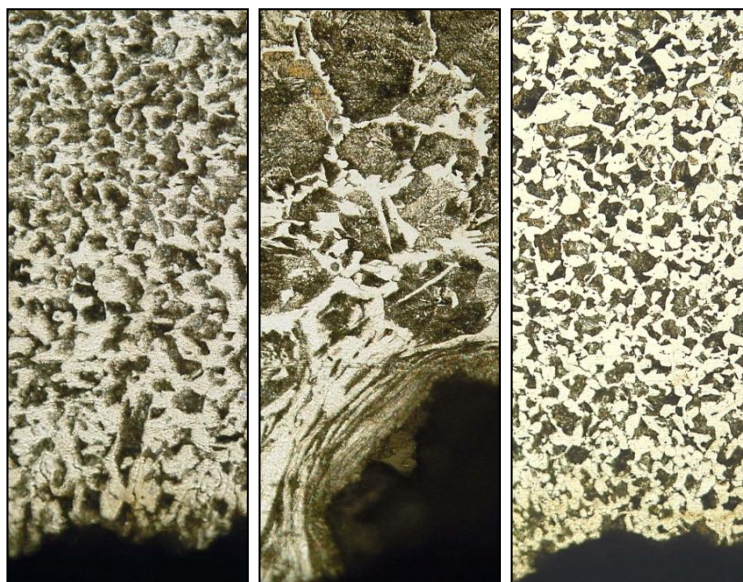


Рис. 3.10 Мікроструктура металу з зовнішньої поверхні стінки балонів,  $\times 200$ ;  
Б18 – *а*; Б23 – *б*; Б20 – *в*

При цьому з внутрішньої поверхні сформована чітка текстура прокату, тоді як в середині товщини – слабо виражена смугастість і, нарешті, з зовнішньої поверхні – практично рівноосна структура (рис. 3.9, *а, в*).

Мікроструктура металу стінки Б23 (рис. 3.9, *б*) істотно відрізняється від структури металу Б18 (3.9, *а*), Б21, Б16 і Б20 (рис. 3.9, *в*), і являє собою грубозернисту перлітну структуру з тонкими виділеннями фериту по межах перлітних зерен, бал зерна № 3÷4. З обох поверхонь стінки має місце знеуглецювання, більш яскраво проявилось з зовнішньої поверхні (рис. 3.9, *б*). Ці спостереження свідчать про те, що метал Б23 зазнав фазові і структурні зміни, по всій видимості, викликані високотемпературним нагріванням.

Таким чином, середній розмір зерна металу Б16, Б18, Б20 і Б21 становить  $\sim 10 \dots 30 \text{ }\mu\text{m}$ , що відповідає балу № 7–8 за ГОСТ 5639-82. Мікроструктура Б23 – грубозернистий перліт з дрібними виділеннями фериту. Середній розмір зерна  $50 \dots 80 \text{ }\mu\text{m}$ , що відповідає балу № 3–4 за ГОСТ 5639-82 (рис. 3.9, *б*). Крім того, біля внутрішньої і зовнішньої поверхонь Б3 зафіксовано знеуглецювання. Отже, найбільш несприятливу мікроструктуру має метал з великим зерном і знеуглецьованими шарами, як із зовнішньої, так і з внутрішньої поверхні. Наявність знеуглецьованих шарів свідчить про зменшення кількості перліту, і

відповідно – зниження мікротвердості на 20...25% порівняно з центральними шарами.

### **3.2 Аналіз взаємозв'язку коерцитивної сили і текстурних параметрів металу**

Для коректної оцінки щодо встановлення кореляційних залежностей між структурними і магнітними параметрами, була визначена кристалографічна текстура металу методом побудови зворотних полюсних фігур [73]. Вимірювання інтегральних інтенсивностей дифракційних рефлексів від кристалографічних площин 110, 200, 211, 220, 310, 222, 321 проводили на зразках з зовнішнього і внутрішнього приповерхневого перетину циліндричної оболонки корпусу після зняття окалини, а також з серединного шару в порівнянні з еталоном, який був приготований з дрібних рекристалізованих ошукрок досліджуваної сталі. Для видалення деформованого при механічній шліфовці шару здійснювали його хімічну полірування на глибину 0,1 мм. Сканування проводили на дифрактометрі ДРОН-3 в однакових умовах зйомки з геометрії Бреґґа-Брентано (рис. 2.11). Знаходили відносини інтегральних інтенсивностей ліній дифракції досліджуваних зразків і еталона. Наведено полюсну щільність, що пропорційна відношенню інтенсивності лінії (hkl) в текстурованому зразку і зразку без текстури [13, 14]:

$$P_{hkl} = \frac{I_{hkl}^T}{I_{hkl}^0} K$$

#### **3.2.1 Оцінка кристалографічної текстури металу балонів**

Як показали дослідження, текстура металу балонів в основному представлена сімейством площин {110} і {001}, так як їх щільність на полюсних фігурах перевищує одиницю, яка відповідає відсутності текстури.

З метою підвищення ефективності результатів технічної діагностики відповідальних зварних конструкцій, було проведено дослідження відносно впливу кристалографічної текстури металу на анізотропію коерцитивної сили і напружено-деформований стан.

Спочатку розглянемо результати аналізу щодо впливу напрямку прокатки і ступеня деформації на показники коерцитивної сили на прикладі сталі 05кп (Таблиця 3.4).

Таблиця 3.4

**Значення коерцитивної сили в напрямках паралельних  
і перпендикулярних напрямку прокатки**

№ зразка	Стан матеріалу	$\varepsilon$ , %	$H_{C(\parallel \text{HP})}$ , А/см	$H_{C(\perp \text{HP})}$ , А/см
1	лист без деформації	0	3,20	3,00
2	обичайка до деформації	0	2,90	3,90
3	обичайка з деформацією	8	4,70	4,30
4	обичайка з деформацією	18	6,80	5,80

Для досліджуваних зразків сталі 05кп [74] виміряна вихідна величина дорівнює 2,6 А/см. На момент руйнування зразка, яке сталася за величиною деформації  $\varepsilon=18\%$ , коерцитивна сила, виміряна після зняття навантаження (після звільнення від пуансонів), зросла майже в 2,4 рази.

Слід зазначити, що з початку пластичного деформування і до руйнування зразків спостерігалось істотне розходження між значеннями  $H_C$  в навантаженому стані і після зняття навантаження. Так, при настанні текучості металу ( $\varepsilon = 2\%$ ) під навантаженням  $H_C \approx 2,3$  А/см, після зняття навантаження  $H_C \approx 4,3$  А/см. Перед руйнуванням зразка під навантаженням  $H_C \approx 4,1$  А/см, а після його зняття  $H_C \approx 6,3$  А/см.

Отже коерцитивна сила підвищується з ростом пластичної деформації металу, як під навантаженням, так і після його зняття. При однаковій пластичної деформації значення  $H_C$  після зняття навантаження в 1,5 (в деяких випадках в 2 рази) вище, ніж під навантаженням [75].

Таким чином, узагальнюючи отримані спостереження, можна зробити висновок, що в листових і трубчастих зразках з конструкційної сталей із зростанням деформації має місце анізотропія коерцитивної сили.



### 3.2.2 Вплив кристалографічної текстури на анізотропію коерцитивної сили

Оскільки кристалографічна магнітна анізотропія (рис. 2.2, б) вносить один з лінійних вкладів у величину  $H_C$ , то представляється доцільним провести лінійний кореляційний аналіз між значенням  $H_C$  і величиною полюсною щільності  $P_{hkl}$ . Оскільки із збільшенням деформації полюсна щільність в НП росте тільки для кристалографічних напрямків сімейства  $\langle 110 \rangle$ , то видається природним провести кореляційний аналіз між значенням коерцитивної сили  $H_{C1}$  в НП і полюсною щільності  $P_{110}$ .

На підставі результатів дослідження (Таблиця 3.5) отримано наступне рівняння регресії:

$$H_{C1} = 2,06P_{110} + 0,25. \quad (3)$$

Коефіцієнт достовірності апроксимації  $R^2 = 0,82$ , що відповідає тісній лінійній кореляції.

Таблиця 3.5

**Значення полюсної щільності  $P$  і коерцитивної сили  $H_C$   
для сталі 05кп у різному стані**

Проба	В напрямку прокатки		Перпендикулярно напрямку прокатки			
	$P_{110}$	$H_C$ , А/см	$P_{211}$	$P_{222}$	$P_{200}$	$H_C$ , А/см
Рулонна сталь	1,48	3,2	0,96	0,55	0,99	3,0
Трубчастий зразок:						
до деформації	1,21	2,9	1,14	0,83	0,86	3,9
деформація 8%	2,62	4,7	1,13	0,77	1,36	4,3
деформація 18%	2,76	6,8	1,42	1,16	1,94	5,8

Коерцитивна сила, виміряна в напрямку, перпендикулярному НП, також зростає з ростом ступеня деформації, але дещо в меншій мірі (Таблиця 3.5). Для цього випадку рівняння регресії мають вигляд:

$$H_{C2} = 6,05P_{211} - 2,78, \quad (3.1)$$

$$H_{C2} = 4,50P_{222} + 0,53, \quad (3.2)$$

$$H_{C2} = 2,19P_{200} + 1,43. \quad (3.3)$$

Відповідні коефіцієнти достовірності апроксимації склали  $R_1^2 = 0,97$ ;  $R_2^2 = 0,94$ ;  $R_3^2 = 0,82$ .

Підвищення  $H_C$  із зростанням полюсною щільності, як у напрямку прокатки, так і в перпендикулярному їй напрямку пов'язано зі збільшенням роботи намагнічування, тобто роботи по переорієнтації вектора намагніченості кристалів (який до включення зовнішнього магнітного поля був орієнтований в напрямку легкого намагнічування  $\langle 100 \rangle$ ) до напрямку важкого намагнічування. Цим кристалографічним напрямком у разі НП є напрямок  $\langle 110 \rangle$ , а в разі ПН – кристалографічні напрямки  $\langle 211 \rangle$  і  $\langle 222 \rangle$ . При цьому збільшення  $H_C$  в ПН із зростанням ступеня деформації менш значно, ніж в НП, тому що частка кристалів  $P_{200}$  з орієнтацією уздовж осі легкого намагнічування  $\langle 100 \rangle$  більша (Таблиця 3.5).

Пояснення намагнічування полікристалічного зразка шляхом усереднення даних для монокристалів також був розглянутий у роботах [76,77,78]. Результати розрахунків мають схожу динаміку при сильних полях, для таких полів намагнічування відбувається за рахунок обертання векторів намагніченості доменів при збіг з напрямком зовнішнього поля при майже відсутніх зсувів кордонів доменів.

*Вплив мікронапружень та розміру ОКР рентгенівських променів.* Деформація призводить до подрібнення областей когерентного розсіювання (ОКР) і зростанню мікронапружень, що викликає розширення рентгенівських дифракційних ліній [79]. Справжні фізичні розширення ліній і значення коерцитивної сили  $H_C$  в НП і ПН для різних ступенів і виду деформації представлені в Таблиці 3.6.

Оскільки напруження і розміри зерен вносять, як зазначалося, лінійні вклади в величину  $H_C$ , то проведений лінійний кореляційний аналіз зв'язку між значенням коерцитивної сили  $H_C$  в НП і ПН і розширенням рентгенівських дифракційних ліній. Отримані наступні рівняння регресії:

$$y_1 = 1,63x_1 + 3,14, R_1^2 = 0,96, \quad (3.4)$$

$$y_1 = -1,40x_2 + 6,67, R_2^2 = 0,27, \quad (3.5)$$

$$y_2 = 1,08x_3 + 3,71, R_3^2 = 0,79, \quad (3.6)$$

$$y_2 = 0,70x_4 + 3,73, R_4^2 = 0,78, \quad (3.7)$$

$$y_2 = 20,01x_5 - 25,79, R_5^2 = 0,72, \quad (3.8)$$

$$y_2 = -1,42x_6 + 4,67, R_6^2 = 0,51, \quad (3.9)$$

де:

$x_1, x_2$  – розширення ліній сімейств  $\{110\}, \{220\}$  в НП,

$x_3, x_4, x_5, x_6$ , – розширення ліній сімейств  $\{200\}, \{400\}, \{211\}, \{222\}$  в ПН;

$y_1$  и  $y_2$  –  $H_C$  в НП и ПН відповідно.

Коефіцієнти достовірності апроксимації досить високі, за винятком кореляційного зв'язку між коерцитивною силою і шириною ліній сімейств  $\{220\}$  і  $\{222\}$ . Вважається, що вплив мікронапружень у зразку сильніше позначається на розширенні дифракційних ліній вищих порядків відбиття, в той час як подрібнення ОКР значніше позначається на розширенні ліній нижчих порядків [80].

Оскільки коефіцієнт достовірності апроксимації  $R$  досить близький до одиниці для кореляційної зв'язку  $H_C$  в НП з розширенням дифракційних ліній сімейства  $\{110\}$ , а для кореляційної зв'язку  $H_C$  ( $\parallel$  НП) з розширенням ліній  $\{220\}$  коефіцієнт  $R$  ближче до нуля, ніж до одиниці, то можна припустити, що в величину  $H_C$  ( $\parallel$  НП) більш значний внесок у напрямку прокатки вносить подрібнення ОКР кристалів сімейства  $\{110\}$ , ніж відповідні залишкові мікронапруження.

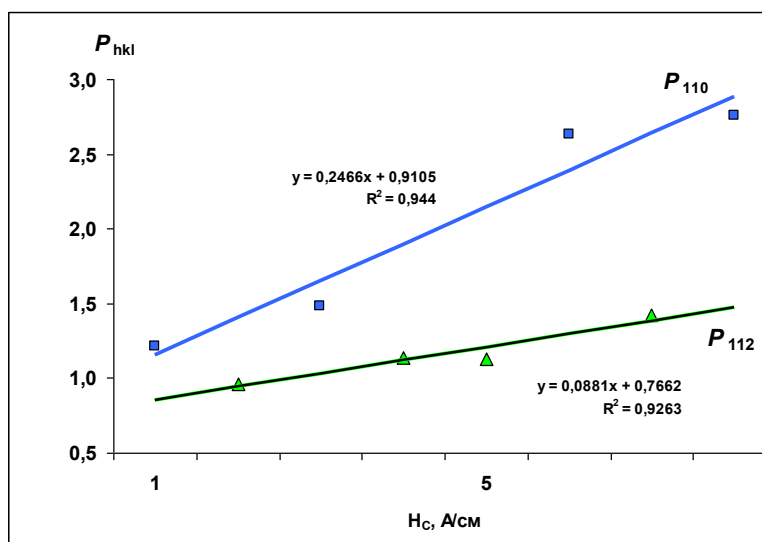


Рис. 3.11 Залежність коерцитивної сили  $H_c$  від кристалографічного напрямку і величини полюсної щільності  $P_{hkl}$

Таблиця 3.6

**Значення істинної фізичної ширини ліній  $\Delta\beta$  і коерцитивної сили  $H_c$ , виміряні в напрямку прокатки (НП) і перпендикулярному їй напрямку (ПН) для сталі 5кп в різному стані**

Параметр	Істина ширина $\Delta\beta$ , рад. $\times 10^3$			
	Рулонна сталь	Трубчастий зразок		
		до деформації	деформація 8%	деформація 18%
$\Delta\beta_{110}$ НП	0,11	0	0,65	2,32
$\Delta\beta_{220}$ НП	1,42	2,58	1,07	1,42
$H_c$ НП, А/см	3,20	2,90	4,70	6,80
$\Delta\beta_{200}$ ПН	0	0,07	0	1,94
$\Delta\beta_{400}$ ПН	0	0	0	2,97
$\Delta\beta_{211}$ ПН	1,49	1,48	1,48	1,57
$\Delta\beta_{222}$ ПН	1,18	0	0	0
$H_{cПН}$ , А/см	3,0	3,9	4,3	5,8

Аналогічно, в дослідженому діапазоні ступенів деформації в зміну величини  $H_c$  і розширення ліній сімейств кристалів  $\{200\}$  і  $\{400\}$  в ПН практично однакові внески можуть вносити як подрібнення ОКР відповідних кристалів, так і залишкові мікронапруження. На підставі того, що  $R$  для кореляційної зв'язку розширення ліній сімейства  $\{222\}$  і  $H_c$  в ПН відносно малий, можна припустити, що зміна величини  $H_c$  в ПН в більшій мірі може бути обумовлено подрібненням ОКР сімейства  $\{111\}$ , ніж залишковими мікронапруженнями.

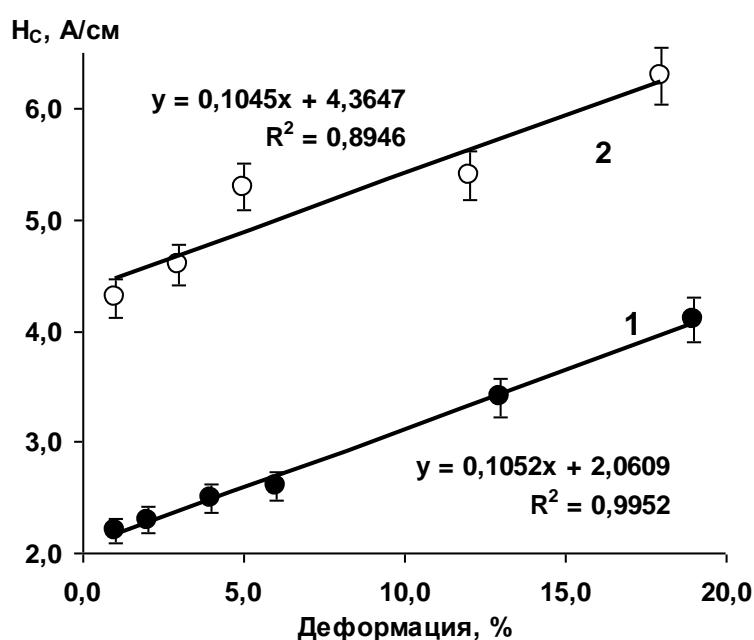


Рис. 3.12 Зміна коерцитивної сили в залежності від деформації:[\*]

під навантаженням – 1; після зняття навантаження – 2 [81]

Зростання лінійної залежності між коерцитивною силою  $H_c$  і текстурними параметрами  $P_{110}$ НП і  $P_{211}$ ПН обумовлено роботою по переорієнтації вектора намагніченості, який до включення зовнішнього магнітного поля був спрямований уздовж осі легкого намагнічування  $\langle 100 \rangle$ .

Таким чином, із зростанням деформації має місце лінійна кореляція величини коерцитивної сили  $H_c$  в НП і ПН з полюсною щільністю і розширенням відповідних дифракційних ліній.

### **3.3 Механічні властивості металу у зв'язку з фрактальними особливостями структури листових і трубчастих елементів**

У зв'язку з тим, що значна частина балонів виготовлена до 01.01.89 і не проходила ультразвуковий контроль суцільності металу, а також в окремих випадках балони експлуатують 50÷60 років замість сорока (*Таблиця 3.1*), то можна було очікувати появи нових дефектів при гідравлічних випробуваннях. Отже, з певної частини балонів після руйнування в результаті цих випробувань, зокрема Б19 та Б22, з великим терміном служби (48 і 56 років) і Б1 та Б2, тільки що виготовлених заводом, було вирізано темплети для проведення фізико-механічних досліджень, включаючи встановлення статичної міцності (*Таблиця 3.7*), опір крихкому руйнуванню (рис. 3.12, 3.13) та текстурний аналіз, який буде розглянуто нижче. Також, крім робіт, направлених на відстеження впливу пластичної деформації на фізико-механічні властивості металу, на балоні Б19 було встановлено бандаж, що перешкоджає деформації ділянки стінки, прилеглої до днища (рис. 3.6, б).

### 3.3.1 Співставлення фрактальних параметрів з відповідними параметрами поверхні зламів

Таблиця 3.7

#### Механічні характеристики металу балонів після руйнування при гідравлічних випробуваннях

№	Товщина стінки, зруйнованої частини, мм	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Розрахунковий робочий тиск, $P_{роз}$ , МПа
Б1	7,7	548,5÷553,5	796,2÷803,8	17,4÷17,7	40,9÷42,5	21,73
Б2	7,7	525,0÷543,6	750,7÷756,2	16,8÷21,1	39,3÷43,2	20,54
Б19	7,4	517,8÷544,3	759,1÷769,2	17,8÷18,2	53,3÷55,3	18,52
Б22	8,5	437,6÷469,8	749,5÷758,2	17,7÷19,3	37,4÷39,9	23,04

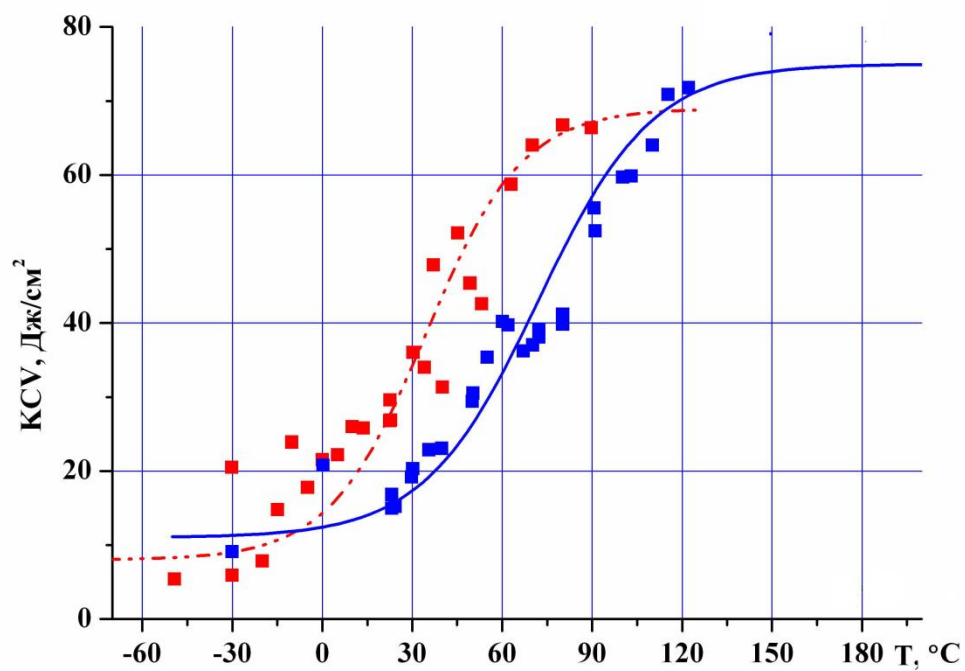


Рис. 3.13 Температурна залежність ударної в'язкості металу балонів:  
Б18 – червоні, Б23 – сині

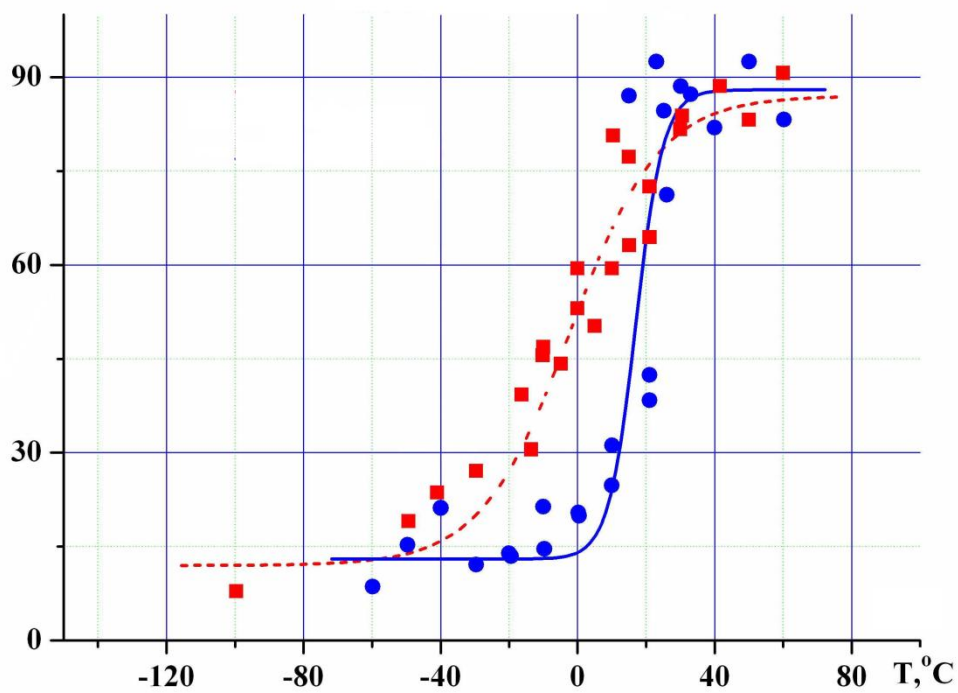


Рис. 3.14 Температурна залежність ударної в'язкості металу балона Б19:  
поза бандажем – червоні, під бандажем – сині



Таблиця 3.8

**Ударна в'язкість ( $KCV$ , Дж/см<sup>2</sup>) металу балонів після  
їх гідравлічних випробувань**

Т °С	Б18		Б21		Б23		Б16		Б20	
-10	19,9	21,8	23,8	21,3	9,6	13,2	26,6	29,3	16,9	17,2
% в'язкої складової	3,0	3,0	4,0	4,0	0	0	2,0	4,0	3,0	4,0
+20	34,2	31,1	36,7	33,8	19,4	16,9	36,0	44,0	33,7	39,1
% в'язкої складової	25,0	25,0	30,0	30,0	2,0	2,0	30,0	40,0	50,0	65,0
+50	47,6	48,5	57,9	67,8	24,2	24,4	64,0	67,8	57,4	60,7
% в'язкої складової	60,0	60,0	75,0	98,0	10,0	10,0	75,0	75,0	100	100
Руйнівний тиск, МПа	49,9		51,4		55,1		48,3		47,3	
Твердість за Роквеллом при 100 кгс	96,7		94,6		96,7		86,9		87,8	

крихке
крихке-крихке-в'язке
в'язке-в'язке-крихке
в'язке

Таблиця 3.9

**Фрактальна розмірність меж зерен та механічні властивості металу**

Балон	Середня фрактальна розмірність $D_{av}$	Ударна в'язкість $KCV$ , J/cm <sup>2</sup>		Руйнівний тиск, $P$ , МПа, 20°C	Границя текучості $\sigma_{0,2}$ , МПа	Границя міцності $\sigma_B$ , МПа
		20°C	-10°C			
Б18	1,11	32,65	20,85	49,9	476	770
Б21	1,14	35,25	22,55	51,4	498	671
Б23	1,10	18,15	11,14	55,1	446	725
Б16	1,13	40,0	27,95	48,3	537	712
Б20	1,11	36,4	17,05	47,3	524	708

Таким чином фізико-механічні дослідження зруйнованих балонів з великим терміном служби не підтвердили прийнятого уявлення про деградацію властивостей металу.

Як свідчить практика, причиною руйнування є не тільки “старіння” металу, а й технологія виготовлення. Сучасними методами контролю не вдається своєчасно оцінити їх придатність для подальшої експлуатації [82]. Про вплив різних структурних і текстурних чинників на механічні властивості сталі балонів та їх коерцитивну силу опубліковано низку праць [83]. Зокрема, виявлено [84] параболічну кореляцію коерцитивної сили з ростом внутрішнього тиску в балоні і запропоновано методику оцінки напружено-деформованого стану та залишкового ресурсу посудин за її значеннями. Встановлено [85], що збільшення вмісту “крихкого” текстурного компонента  $\{001\} \langle 110 \rangle$  супроводжується зростанням коерцитивної сили внаслідок підвищення кількості кристалів, що намагнічуються в напрямку  $\langle 110 \rangle$ . Проаналізовано також вплив розміру зерна на пошкодженість балонів, але структуру меж зерен не вивчено. Хоча у полікристалічних металевих матеріалах вона відіграє важливу роль під час визначення механічних властивостей [86], оскільки саме там здебільш зароджуються і поширюються тріщини. Міжзеренне руйнування може викликати крихкість конструкційних матеріалів [87] і уникнути цього можна, зміцнюючи межі зерен [88] та змінюючи їх морфологію.

Фрактальну природу дислокаційної структури в сталі після контрольованого вальцювання вивчали раніше [89]. Але відсутні результати про вплив звивистості меж зерен на механічні властивості металу кисневих балонів. Кількісно визначити цей параметр можна за їхньою фрактальною розмірністю – мірою складності об’єкта. Тому конфігурацію меж зерен оцінюють за фрактальною розмірністю їх профілю у двовимірному просторі ( $1 \leq D \leq 2$ ), яку коротко називають фрактальною розмірністю межі зерна [87, 107].

Встановлено (рис. 3.15 *a*), що з ростом фрактальної розмірності меж зерен від 1,10 ударна в'язкість спочатку збільшується, а руйнівний тиск зменшується, але далі вони досягають насичення. Найменша фрактальна розмірність 1,10 відповідає металу балона Б23, який крихко руйнувався навіть при кімнатній температурі [101] за найменшої ударної в'язкості і найбільшого руйнівного тиску. Випробування всіх балонів на ударну в'язкість при  $-10^{\circ}\text{C}$  також підтвердили крихкий характер руйнування. При цьому зі збільшенням фрактальної розмірності меж зерен, а отже, їх звивистості поширення тріщини вздовж початкового напрямку ускладнюється: її вплив на поведінку тріщини слабшає.

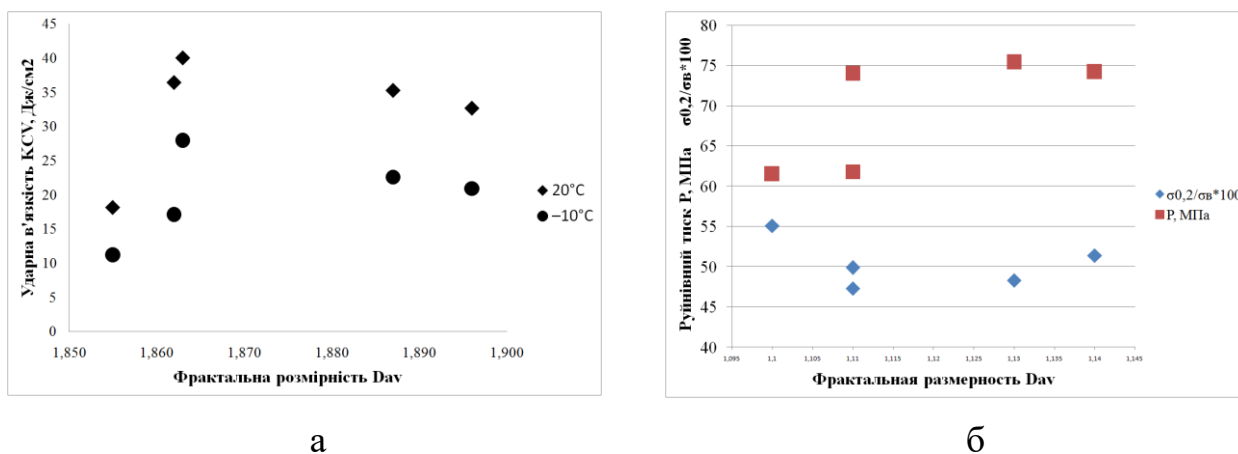


Рис. 3.15 Кореляційні залежності середньої фрактальної розмірності  $D_{av}$  меж зерен (див. рис. 3.15) з: *a* – ударною в'язкістю  $KCV$  при  $-10^{\circ}\text{C}$  (крива 1) і  $20^{\circ}\text{C}$  (крива 2), руйнівним тиском (крива 3), а також *b* – границями текучості  $\sigma_{0.2}$  (крива 1) і міцності  $\sigma_B$  (крива 2).

Це може означати, що механізм руйнування мішаний інтеркристалітний – транскристалітний, що призводить до росту ударної в'язкості. Іншими словами, тріщина або росте вздовж звивистої частини межі, або поширюється крізь зерно, і для подальшого її руху вздовж межі потрібно більше енергії, ніж для руху крізь матрицю [96]. Досліджуючи злами ударних зразків, виявили, що за низьких температур випробувань метал Б21 руйнується за механізмом квазівідколу (рис. 3.16 *a*). Розмір фасеток руйнування 10...30  $\mu\text{m}$ . Вторинні

тріщини відсутні і осередки руйнування чітко окреслені. У зламі присутні елементи пластичного руйнування: “джгути”, перемички і окремі в’язкі ямки.

Метал Б23 при низьких температурах руйнується за механізмом транс-кристалітного відколу з яскраво вираженим струмковим візерунком (рис. 3.16 *b*). Розмір фасеток крихкого руйнування 50...80  $\mu\text{m}$ . На границях зерен виявили вторинні тріщини. Частка в’язкої складової незначна: змінюється від 10% при  $-30^\circ\text{C}$  до 15% при  $100^\circ\text{C}$ . Вищий опір руйнуванню металу балона Б21 проти Б23 у діапазоні температур в’язко-крихкого переходу пов’язаний як з більш дрібнозернистою його структурою (10...30 проти 50...80  $\mu\text{m}$ ) і більшою фрактальною розмірністю меж зерен ( $D_{av} = 1,14$  проти 1,10), так і з різним фазовим складом у межах зерен. Тому метал руйнувався за різними механізмами: Б21 – квазівідколом, а Б23 – крихким відколом. При цьому для того, щоб у Б21 зародилась мікротріщина, необхідна більша енергія, ніж для Б23, через що в’язка зона під надрізом (зона в’язкого підростання тріщини) у ньому протяжніше [102].

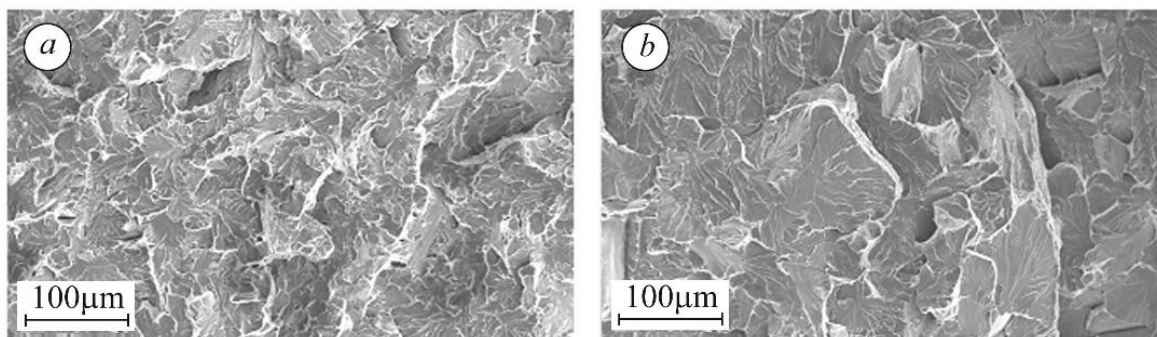


Рис. 3.16 Поверхня руйнування ударних зразків,  $\times 200$ : Б21 при  $-20^\circ\text{C}$  (*a*) і Б23 при  $-30^\circ\text{C}$  (*b*).

Характер кореляції з фрактальною розмірністю меж зерен і границі текучості  $\sigma_{0,2}$  (рис. 3.16 *b*, крива 1). Рівняння регресії має вигляд

$$\sigma_{0,2} = (-1,53 \cdot 10^8 + 5,18 \cdot 10^2 D_{av}^{152,92}) / (8,09 \cdot 10^2 + D_{av}^{152,92}), \quad R = 0,80; \quad S = 44. \quad (7)$$

Кореляційний аналіз границі міцності  $\sigma_B$  металу балонів засвідчив відсутність її зв’язку з фрактальною розмірністю меж зерен на відміну від умовної границі текучості (рис. 3.16 *b*, крива 2). Тут рівняння регресії має вигляд:

$$\sigma_B = 710,28; \quad R = 0,02; \quad S = 53.$$

Таким чином, виконано кількісний фрактальний аналіз границь зерен мікроструктури сталі Дс ряду кисневих балонів з терміном експлуатації від 18 до 55 років. Фрактальна розмірність границь зерен визначена методом накладення на зображення обраної границі квадратних осередків різного розміру і підрахунком кількості точок, які з нею перетинаються. Встановлено тісний кореляційний зв'язок фрактальної розмірності меж зерен з ударною в'язкістю, руйнуючим тиском і межею плинності. Знайдені відповідні рівняння регресії. Проаналізовано механізми руйнування, що обумовлені фрактальною розмірністю границь зерен.

### **3.3.2 Експериментальні дослідження ударної в'язкості у зв'язку з анізотропією прокату**

Випробування конструкційних матеріалів, зокрема, сталі на ударну в'язкість проводять для визначення критичної температури крихкості, щоб встановити здатність матеріалу чинити опір крихкому руйнуванню. Одними з найпоширеніших є випробування зразків Шарпі при ударному навантаженні. Зазвичай відчувають серію зразків при різних температурах і будують криві ударна в'язкість - температура. При цьому визначають критичну температуру крихкості (поріг холодноламкості). Як відомо, температурі холодноламкості відповідає вид зламу, при якому частка тендітних і вузьких ділянок знаходиться в співвідношенні «50:50» [99]. Для проведення ударних випробувань використовується різне обладнання та методики оцінки, що призводить до великого розкиду результатів [100]. У число причин такого розкиду входить, зокрема, наявність в досліджуваному матеріалі кристалографічної і механічної текстури. Текстура, як відомо, є однією з основних причин анізотропії фізико-механічних властивостей матеріалу. Тому при механічних випробуваннях слід також враховувати напрям вирізки зразків з листів або пластин випробуваного матеріалу [101]. Інформативність випробувань на ударну в'язкість можна підвищити шляхом застосування сучасних методик і високошвидкісних систем реєстрації діаграм навантаження - час руйнування (тимчасові криві навантаження). Додаткові інформативні можливості можна отримати шляхом

дослідження фрактальних розмірностей (ФР) [102] тимчасових кривих навантаження ( $D_c$ ) і фрактальних розмірностей зламів ( $D_f$ ).

Для виявлення характерних ознак анізотропії [4], з фрагменту зруйнованої обичайки колони  $\varnothing$  2200 мм і товщиною стінки 12 мм, із високоякісної вуглецевої сталі 20К (ДСТУ 8540:2015), були вирізані зразки для випробувань на короточасний розтяг та ударний вигин (ДСТУ EN 10045-1:2006) у трьох напрямках: поздовжньому (НП), поперечному (ПП) та під кутом  $45^\circ$ .

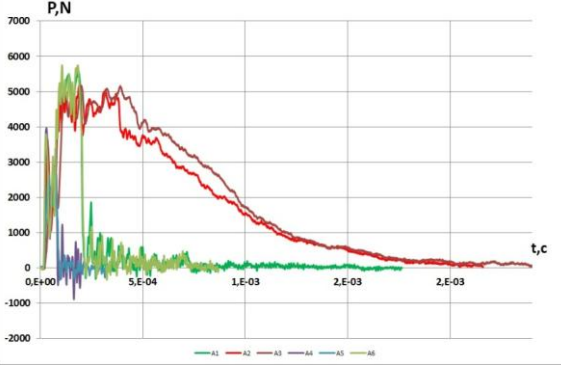
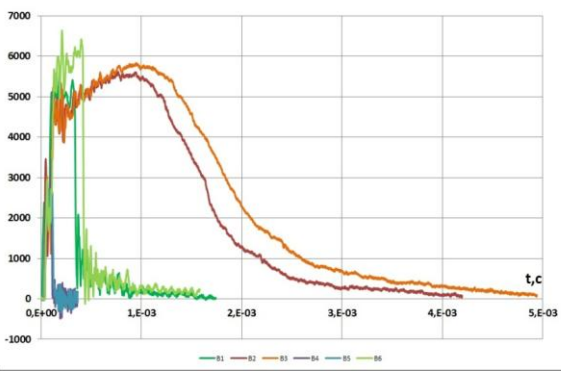
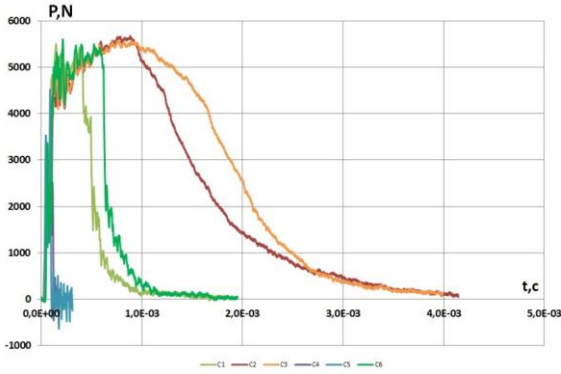
Випробування на короточасний розтяг при кімнатній температурі та випробування на ударний вигин в діапазоні температур від  $-50^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$  були проведені на маломірних зразках Шарпі (ДСТУ EN 10045-1:2006) з подальшим аналізом профілів кривих і поверхонь руйнування за допомогою фрактального методу.

Як можна бачити за результатами випробувань на короточасний розтяг (табл. 1), значної схильності металу до анізотропії не виявлено, за винятком деякого відхилення відносного звуження поздовжніх зразків, порівняно з іншими зразками, що ймовірно пов'язане з розвитком тріщини стосовно напрямку прокату.

З іншого боку відомо, що найбільш чутливими показниками щодо структурного стану металу, у тому числі і до схильності прокату до анізотропії, є результати випробувань на ударний вигин [5]. Так, згідно до кривої крихко-в'язкого переходу при ударних навантаженнях, ознаками анізотропії можуть бути різні значення температури крихко-в'язкого переходу  $T_x$  (тобто зсув по температурній осі), а також загальна величина ударної в'язкості для зразків різного напрямку [6, 7]. Ці ознаки відбиваються також на характері і площі під тимчасовими кривими руйнування. Тобто вищому значенню сумарної енергії зародження і розповсюдження тріщини, відповідає більша площа під кривою ударної в'язкості (рис. 1). Але найбільш точну оцінку можна отримати, враховуючи фрактальну розмірність профілю кривої, при співставленні з фрактальною розмірністю зламів (табл. 2).

Таблиця 3.10

Результати випробувань на короточасний розтяг та відповідні криві випробування зразків на ударний вигин в трьох напрямках

Поздовжній напрям				
$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	
41,5	26,4	31,7	62,5	
Поперечний напрям				
$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	
41,2	26,8	32,0	67,1	
Напряг під кутом 45 градусів				
$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	
41,9	26,3	31,6	68,7	

До визначення фрактальної розмірності профілю тимчасової кривої, що відповідає загальній роботі руйнування ( $D_k$ ), в тому числі тієї частини кривої, яка відповідає енергії зародження тріщини ( $D_{kmax}$ ), застосовано підхід, який набув розвитку у роботі [8]. Крім того в табл. 2 наведено дані щодо фрактальних розмірностей зламів ( $D_{st}$ ), а на рис. 3.17 показана типова поверхня зламу ударного зразка.

Таблиця 3.11

**Взаємозв'язок фрактальних розмірностей кривих руйнування  
і відповідних поверхонь зламів в діапазоні температур  $-50^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$**

n	Температура T, °C	Фрактальна розмірність		
		D <sub>kmax</sub>	D <sub>st</sub>	D <sub>k</sub>
Повздовжній напрямок руйнування				
S1	-50,0	1,216	1,960	1,149
S2	-50,0	1,251	1,962	1,153
S3	19,5	1,148	1,961	1,217
S4	22,0	1,363	1,959	1,209
S5	50,0	1,249	1,953	1,160
S6	50,0	1,349	1,956	1,157
Поперечний напрямок руйнування				
S7	-50,0	1,311	1,956	1,159
S8	-50,0	1,257	1,962	1,158
S9	19,5	1,312	1,958	1,196
S10	22,0	1,318	1,952	1,193
S11	50,0	1,309	1,959	1,171
S12	50,0	1,272	1,961	1,154
Напрямок руйнування під кутом 45°				
S13	-50,0	1,247	1,963	1,097
S14	-50,0	1,318	1,972	1,138
S15	19,5	1,319	1,936	1,133
S16	22,0	1,342	1,951	1,154
S17	50,0	1,269	1,959	1,125
S18	50,0	1,268	1,960	1,124



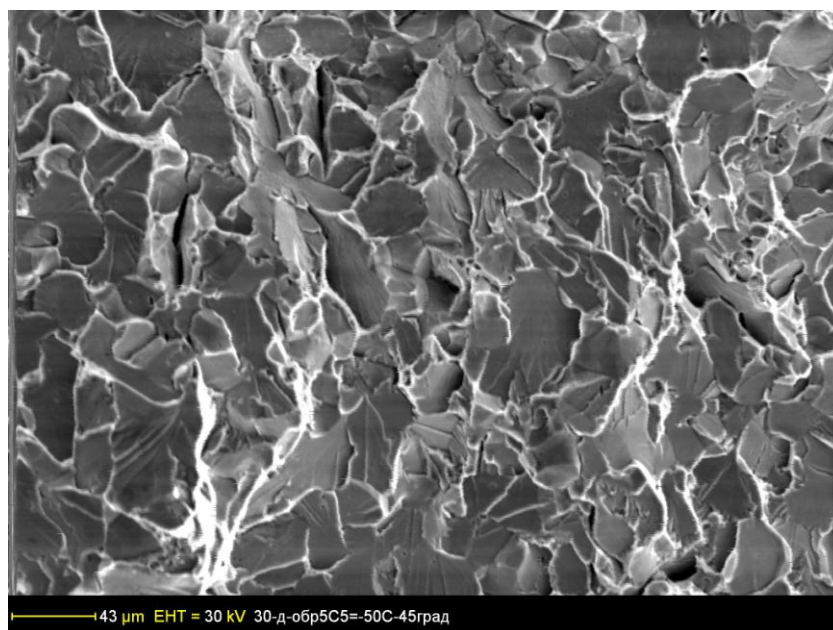
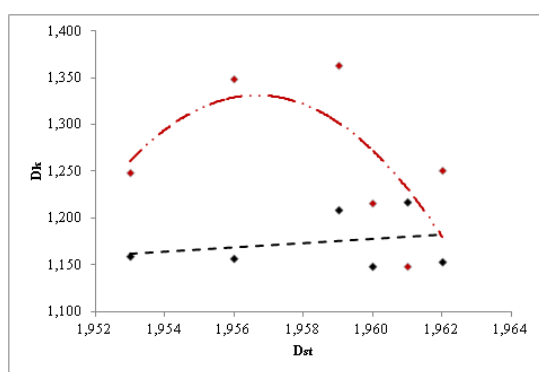
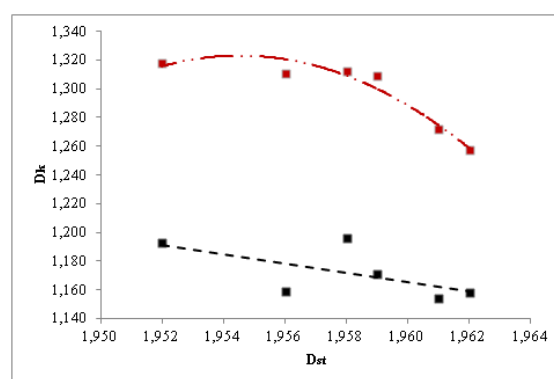


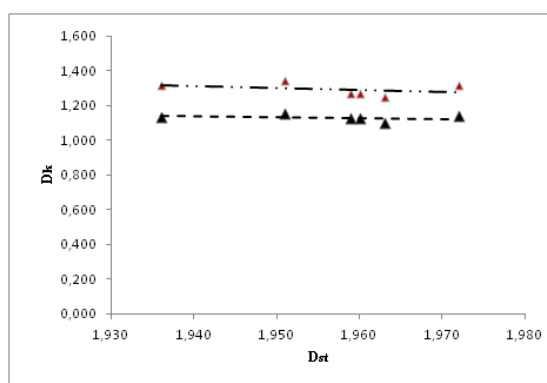
Рис 3.17 Поверхня руйнування після випробування зразків на ударний вигин при температурі – 50 С та під кутом 45 градусів.



**а**



**б**



**в**

Рис 3.18 Взаємозв'язок фрактальних розмірностей ділянок кривих руйнування на стадії зародження тріщини і відповідних поверхонь зламів в зразках

(двокрапка пунктирна лінія) та взаємозв'язок фрактальних розмірностей кривих загального руйнування і відповідних поверхонь зламів в зразках (пунктирна лінія): повздовжній напрямок—а; поперечний напрямок – б; під кутом  $45^\circ$ —в.

В той же час взаємозв'язок між фрактальними розмірностями кривих, які включають як стадію зародження, такі стадію розповсюдження руйнування та відповідними розмірностями поверхонь руйнування зразків, мають різний характер (рис. 3 – двокрапка пунктирна лінія). Так, лінійну залежність мають лише зразки, вирізані під  $45^\circ$  (рис. 3,в). Для повздовжнього напрямку (рис. 3,а), а також для зразків, вирізаних поперечно (рис. 3,б) залежність має поліноміальний вид другого порядку. Тим не менше той факт, що в різних напрямках існують різні типи залежностей, може свідчити про ознаки анізотропії. Отже, вплив анізотропії прокату відбивається лише на стадії розвитку руйнування, що має бути враховано при виборі матеріалу відповідного призначення.

*Таким чином*, співставлення фрактальних розмірностей кривих руйнування з відповідними фрактальними розмірностями поверхонь зламів показали, що вплив анізотропії прокату має місце лише на стадії розповсюдження тріщини, енергія зародження тріщини практично не залежить від напрямку прокату.

**Результати експериментальних досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:**

1. Штофель О.А., Рабкіна М.Д. Фрактальная природа трещин при анизотропии. – Київ VIII МКМУ «Зварювання та споріднені технології», 2015. – 318.

2. Olga Shtopfel, Marjana Rabkina ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДО ВИВЧЕННЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ. Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування 58 (2), 2019 – с.28-33. (Index Copernicus, Google Scholar, BASE, WorldCat, OpenAIRE, наукометричної бази даних "ПІНЦ") ISSN: 2663-3450

3. Shtofel O, Chijskaya T., Kulieznova S., Metallographic studies of vessel steel samples: ДС, 35Г / 40Г and steel 20 by fractal analysis. Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS) ISSN: 2458-925X Vol. 6 Issue 2, February – 2020

4. Штофель О. О., Чижська Т. Г. Підготовка металевого зразка до вивчення його мікроструктури методом фрактального аналізу. - Інноваційні вектори розвитку сучасних наукових досліджень: XXI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція: тези доповідей, Харків, 11 жовтня 2019 р. – Ч. 1. – Дніпро: ГО «НОК», 2019 – с. 48-54

5. Штофель О.О., Чижська Т.Г. Об инвариантности фрактальной размерности на примере трещины в металле. - International scientific conference INNOVATION AROUND US '2020 Conference proceedings - SWorld in conjunction with D.A. Tsenov Academy of Economics, Svishtov, Bulgaria, FEBRUARY 27-28, 2020 – с. 23-27

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Вимірювання проведені при підготовці балонів до гідравлічних випробувань, *вперше* дозволили дізнатися, що являє собою внутрішня поверхня балонів і визначити потенційно небезпечні ділянки циліндричної стінки при тому, що допустима товщина стінки за ДСТУ, повинна бути не менше 6,8 мм. Ці відомості представляють надзвичайний інтерес не тільки в окремому випадку, але й під час експлуатації балонів – при вирішенні питання продовження або припинення терміну служби.

2. Проведені гідравлічні випробування показали, що міцність балонів визначається не тривалістю експлуатації, а їх технічним станом. Фізико-механічні дослідження зруйнованих балонів з великим терміном служби не підтвердили прийнятого уявлення про деградацію властивостей металу.

3. Оцінка товщини стінки балонів за допомогою ультразвукового товщиноміра УТ-04 ЕМА (Дельта) і напружено-деформованого стану за допомогою коерцитиметра КРМ-Ц К2М дала можливість отримати корисну

інформацію щодо технічного стану балонів. Отже товщинометрію та коерцитиметрію доцільно рекомендувати для технічного діагностування балонів.

4. Встановлено кореляцію між  $H_c$  (y) і  $t$  (x), яка, в основному, характеризується лінійною залежністю типу:  $y = A \cdot x + B$ , а значення коерцитивної сили, виміряні в одних і тих же точках вздовж циліндра і в кільцевому напрямку, розташовуються еквідистантно.

5. В результаті визначення металографічних і кристалографічних особливостей металу, підтверджена залежність коерцитивної сили від структурно-текстурних параметрів сталі.

6. Показано, що фазові перетворення, які призводять до зростання зерна, а також посилення «крихкої» текстурної компоненти  $\{001\} \langle 110 \rangle$  супроводжуються зростанням коерцитивної сили за рахунок збільшення кількості кристалів, що намагнічуються в напрямку важкого намагнічування  $\langle 110 \rangle$ .

7. В результаті проведених розрахунків методом кінцевих елементів встановлено критичні значення тиску передруйнування в досліджуваних балонах з похибкою в 9-10%, що виникає через неповну картини з вимірювання товщини стінки, використання даних механічних випробувань для одноосного напруженого стану, а також – неоднорідності структури металу конструкції.

## **РОЗДІЛ 4 ЗАСТОСУВАННЯ ПІДХОДІВ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОЇ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ**

Одним з вирішальних факторів, який визначає механічні властивості металу, є, як відомо, його мікроструктура, основним інструментом вивчення якої є металографія. Завданням металографії, в першу чергу, вважається встановлення взаємозв'язку між якісними та кількісними характеристиками мікроструктури, з одного боку, фізичними і механічними, технологічними і експлуатаційними властивостями металевих матеріалів, з іншого.

В даний час оцінку зміни структури металевих матеріалів здійснюють традиційними металографічними методами, а механічних властивостей - відповідними випробуваннями. Однак традиційні методи досліджень не дають досить точну кореляцію структури і властивостей і вимагають трудомісткої підготовки зразків і численних випробувань відповідно до нормативно-технічної документації. З одного боку аналіз традиційних методів електронної та оптичної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу, кількісної металографії свідчить, що жоден з них не може бути універсальним і придатним для рішення повного обсягу завдань ідентифікації якісних характеристик металу шляхом аналізу його структури. З другого боку у ряді випадків майже недопустима або просто неможлива вирізка зразків з діючих об'єктів, що перебувають у експлуатації.

Проте подібних випробувань можна уникнути, використовуючи методологію параметризації структур. У зв'язку з цим для реалізації даної проблеми бачиться перспективним напрямком – встановлення взаємозв'язку механічних властивостей металевих матеріалів з результатами мультифрактальної параметризації цифрових зображень їх мікроструктури.

Залучення для оцінки структури фрактальної геометрії надає можливість розраховувати фрактальну (дробову) розмірність складових структури. Фрактальна розмірність служить строгою кількісною характеристикою

параметрів структури металів, що мають складну конфігурацію, наприклад: зерен, меж зерен, поверхонь руйнування, скупчень дислокацій, дрібнодисперсних часток вторинних фаз і т.д. В фрактальній розмірності відбивається компактність заповнення простору досліджуваним структурним елементом.

*Таким чином*, передумовою для проведення досліджень, спрямованих на встановлення можливої взаємно однозначної відповідності між якісними характеристиками досліджуваного металу і фрактальною розмірністю його мікроструктури та включень, є припущення щодо їх взаємної однозначної відповідності. Розробка методу визначення механічних властивостей металу шляхом аналізу фрактальної розмірності складових його структури доповнює існуючі методи оцінки якісних характеристик в матеріалознавстві, що дозволяє встановлювати зв'язок між структурою і механічними властивостями металу. Такий підхід дає можливість заощадити витрати, які потрібні для проведення механічних випробувань.

#### **4.1 Металографічні дослідження зразків арматурних канатів захисних оболонок атомних енергоблоків**

Одним з важливих параметрів технічного стану металу є його механічні характеристики, які під дією технологічних (виготовлення, транспортування, монтаж) і експлуатаційних (умови експлуатації – температура, тиск, середа, циклічність) факторів могли змінитися щодо свого вихідного стану. Нормативні документи вказують при експертизі промислової безпеки, в залежності від умов експлуатації, виконання механічних випробувань і металографічних досліджень структури металів конструкцій. Результати випробувань використовуються при виконанні перевірочних розрахунків на міцність і далі при розрахунках залишкового ресурсу. Однак на практиці виконання зазначених випробувань неможливо через тимчасові фактори (зупинки на ремонт) і недоцільні, тому що вирізки зразків і подальший ремонт із застосуванням зварювання завдають шкоди (виникають додаткові напруження) металу а, отже, і обстежуваному обладнанню. Використання ж

нормативних розрахункових значень механічних характеристик при виконанні розрахунків на міцність обладнання, яке відпрацювало 20-30 і більше років в жорстких умовах, не зовсім коректно. Тому пошук інформативного способу визначення механічних властивостей металу, без руйнування елементів конструкції є дуже актуальним завданням.

Безпечна експлуатація атомних електростанцій, а отже технічні характеристики елементів енергоблоків АЕС є безумовним пріоритетом діяльності відповідає положенням Конвенції про ядерну безпеку (Закон України від 17 грудня 1997 року).

Для забезпечення міцності конструкції гермооб'єму всередині оболонки використані спеціальні арматурні канати з холоднотягнутого. Арматурні канати (АК) виконані з стабілізованою сталевий високоміцного дроту методом безперервної намотування, конфігурація їх розташування в циліндричній частини є гелікоїдально-петлевою і ортогонально-петлевою у куполі. також монтується система контрольно-вимірювальної апаратури для контролю за напруженим станом АК і внесення необхідних уточнень ступеня натягу при виході параметрів напруженого стану за допустимі межі [103].

Представлені також методи оцінок і перевірок стану, а також методологія надійності на основі поточних і майбутніх оцінок стану [104,105,106]. Однак руйнування арматурних канатів залишаються поза увагою дослідників. Причини розривів АК можуть бути пов'язані з умовами виготовлення (структура та механічні властивості сталі, геометрія перетину дроту, характер скруту та ін.), так і з умовами експлуатації – збільшення напружень і часті знакозмінні навантаження; нерівномірне навантаження дротів в пучку АК, зокрема, в місцях вигину каната на блоках або барабані; зношування дротів каната внаслідок їх взаємного тертя в місцях торкання і додаткове зношування зовнішніх дротів каната, що стикаються з поверхнею жолоба блоку і барабану; застосовувані мастильні матеріали; наявність абразивного пилю і хімічно активних середовищ та ін.

Тому залишаються актуальними експериментальні дослідження впливу саме структурних характеристик на закономірності руйнування сталевих арматурних канатів із залученням фізичних методів досліджень. При цьому перспективним вважається застосування фрактального методу при дослідженні поверхонь руйнування [20]. Тісні кореляційні зв'язки фрактальної розмірності структури металу з ударною в'язкістю, руйнівним тиском і межею плинності сталі встановлені на прикладі кисневих балонів [61].

#### **4.1.1 Аналіз результатів хімічного складу і мікроструктури металу дротів армоканатів (АК)**

Фрагменти дротів довжиною 500...550 мм і діаметром близько 5 мм були вирізані з трьох різних ділянок: верхній і нижній (по відношенню до місця розриву) каната, а також неушкодженої ділянки, умовно названої середньою частиною зруйнованого каната. Ці фрагменти були піддані комплексним дослідженням.

Визначення хімічного складу металу фрагментів виконано на рентген-флуоресцентному спектрометрі СЕР-01 «Elvax Light» і аналізаторі вуглецю ГОУ-1.

Результати спектрального аналізу наведені у таблицях 4.1-4.6, де вказані масові частки змісту хімічного елемента в пробі у відсотках.

*Таблиця 4.1.*

#### **Вміст елементів у досліджених дротах АК1 (сталь 80), мас. %**

Партія	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu
Верх	0,80	0,31	0,57	0,11	-	0,01	0,015	0,18
Низ	0,81	0,26	0,57	0,14	0,045	0,01	0,014	0,13
Середина	0,80	0,23	0,45	0,15	-	0,01	0,015	0,18

Виявлено підвищений вміст хрому і міді в металі, наявність хрому може позначитися, як на формування фазових складових, так і на підвищення міцностних властивостей, і, відповідно на схильність металу до крихкого



руйнування. Крім того, в нижній частині зруйнованого каната виявлено присутність нікелю.

*Таблиця 4.2.*

**Вміст елементів у досліджених дротах АК2 (сталь 85), мас. %**

Партія	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Cu
Верх	0,80	0,32	0,54	0,68	0,020	0,01	0,129	0,080
Низ	0,80	0,23	0,47	0,68	0,020	0,01	0,123	0,093
Середина	0,80	0,33	0,70	0,70	0,017	0,01	0,126	0,138

Виявлено не передбачений стандартом нікель, але він може лише підвищувати пластичність, міцність і антикорозійні властивості сталі, в основному завдяки сприянню подрібненню зерна.

*Таблиця 4.3.*

**Вміст елементів у досліджених дротах АК3 (сталь 85), мас. %**

Партія	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Cu
Верх	0,88	0,30	0,44	-	0,015	0,01	0,104	0,034
Низ	0,84	0,23	0,40	-	0,015	0,01	0,106	0,031
Середина	0,89	0,29	0,41	-	0,014	0,01	0,109	0,047

Зафіксовано занижений вміст марганцю, що може впливати на формування структурних і фазових складових та на схильність металу до крихкого руйнування.

*Таблиця 4.4.*

**Вміст елементів у досліджених дротах АК4 (сталь 85), мас. %**

Партія	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
Верх	0,880	0,303	0,440	0,015	0,01	0,104	0,034
Низ	0,840	0,234	0,396	0,015	0,01	0,106	0,031
Середина	0,895	0,285	0,412	0,014	0,01	0,109	0,047

Виявлено знижений вміст марганцю та підвищений вміст хрому, наявність зниженого вміст марганцю може позначитися, як на формування фазових

складових, так і на підвищення міцності властивостей, і, відповідно на схильність металу до крихкого руйнування.

Таблиця 4.5.

**Вміст елементів у досліджених дротах АК5 (сталь 70), мас. %**

Партія	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Mo
Верх	0,68	0,37	0,62	0,24	0,12	0,024	0,015	<0,1
Низ	0,72	0,40	0,80	0,15	< 0,10	0,029	0,031	<0,1
Середина	0,78	0,37	0,67	0,30	0,16	0,040	0,020	<0,1

Таблиця 4.6.

**Вміст елементів у досліджених дротах АК6 (сталь 85), мас. %**

Партія	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu
Верх	0,83	0,18	0,58	0,12	0,08	0,008	0,015	0,19
Низ	0,80	0,20	0,56	0,15	-	0,005	0,010	0,12
Середина	0,80	0,20	0,55	0,06	-	0,003	0,016	0,04

За хімічним складом метал дротів АК в основному відповідає маркам сталі (ГОСТ14959-79), що узгоджується з вимогами ТУ У 00191046.014-95.

Таблиця 4.6.

**Хімічний склад металу дроту згідно ГОСТ 14959-79**

Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu
Ст.70	0,67- 0,75	0,17- 0,37	0,5 - 0,8	≤ 0,25	≤ 0,25	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,2
Ст.80	0,77- 0,85	0,17- 0,37	0,5 - 0,8	≤ 0,25	≤ 0,25	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,2
Ст.85	0,82 - 0,90	0,17- 0,37	0,5 - 0,8	≤ 0,25	≤ 0,25	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,2

Огляд мікроструктури металу дротів АК [107], а також неметалічних включень в більший мірі дають можливість описати та зв'язати механічні властивості із фрактальною розмірністю. Також, слід зазначити, що властивості вуглецевої сталі, наприклад твердість, залежать не тільки від хімічного складу сплаву (перш за все - вуглецю), але також і від технології отримання виробів (структура) і наступних умов експлуатації. Від неметалічних включень багато в чому залежать як технологічні, так і механічні (ударна в'язкість) і експлуатаційні властивості (стійкість до корозії) сталі.

Неметалічні включення і мікроструктури досліджували на мікроскопі НЕОРНОТ-32 при  $\times 500$ -кратному збільшенні із застосуванням цифрової фотокамери OLYMPUS.

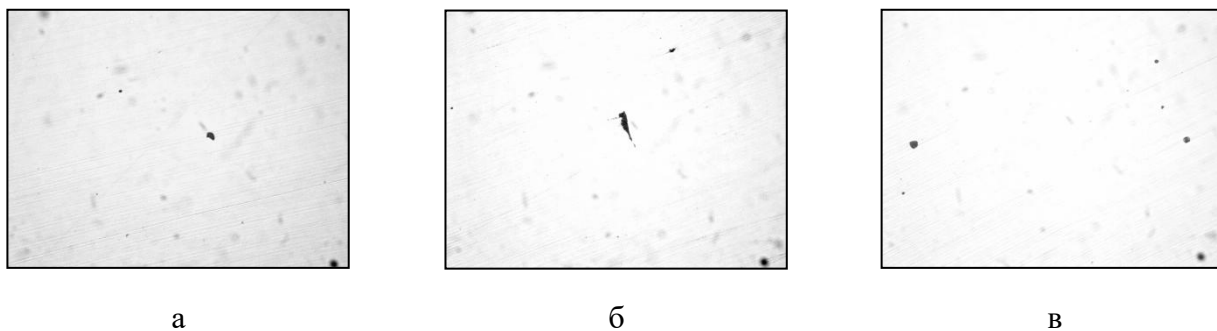


Рис. 4.1. Неметалеві включення на полірованій поверхні поперечного перерізу дроту армоканатах АК1 ( $\times 500$ ); верхня частина - а, нижня частина - б, середня частина - в.

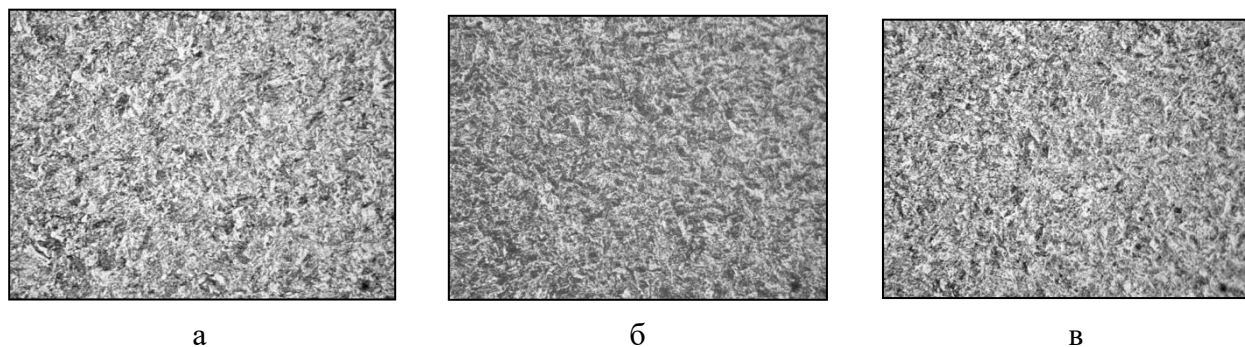


Рис. 4.2. Мікроструктура металу дроту армоканатах АК4 ( $\times 500$ ); верхня частина - а, нижня частина - б, середня частина - в.

Таблиця 4.7

## Середні значення характеристик\* металу досліджених дротів

Канат	Партія	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{02}$ , МПа	$D_{ст}$	$D_{вк}$	$\omega$	$\delta$ , %	$\psi$ , %
АК1	Верх	1771,3	1639,0	1,746	0,897	0,53	4,0	29,3
	Низ	1812,4	1670,9	1,828	1,036	0,2	1,4	2,3
	Середина	1818,6	1634,8	1,79	1,127	0,57	5,0	37,6
АК2	Верх	1664,4	1469,0	1,957	0,998	0,13	1,1	10,8
	Низ	1741,6	1530,4	1,932	0,951	0,38	2,3	15,7
	Середина	1806,0	1586,2	1,901	0,92	0,58	5,2	37,2
АК3	Верх	1785,0	1544,4	1,913	0,927	0,54	4,2	34,2
	Низ	1695,1	1370,2	1,948	0,936	0,49	3,2	13,1
	Середина	1754,3	1456,9	1,923	0,909	0,63	6,3	46,8
АК4	Верх	1785,0	1544,4	1,912	0,935	0,54	4,2	34,2
	Низ	1695,1	1370,2	1,953	0,931	0,49	3,2	13,1
	Середина	1754,3	1456,9	1,929	0,909	0,63	6,3	46,8
АК5	Верх	1720,8	1684,2	-	1,005	0,07	1,0	8,0
	Низ	1704,0	1483,5	1,973	0,961	0,36	2,1	12,7
	Середина	1767,7	1583,1	-	0,922	0,58	5,0	37,7
АК6	Верх	1758,8	1540,0	1,921	0,927	0,54	4,2	21,5
	Низ	1699,6	1543,7	1,951	0,932	0,51	3,5	25,2
	Середина	1762,1	1543,7	1,926	0,925	0,56	4,6	46,6
ТУ У 00191046.014-95		1670,0	1500,0	-		-	4,0	-

\*  $\sigma_B$ , МПа - тимчасовий опір або межа міцності,  $\sigma_{02}$ , МПа - межа плинності,  $D_{ст}$  – фрактальна розмірність мікроструктури,  $D_{вк}$  – фрактальна

розмірність включень,  $\omega$  - пошкодженість металу,  $\delta, \%$  - відносне видовження,  $\psi, \%$  - відносне звуження.

Були отримані середні значення механічних характеристик міцності (границь міцності  $\sigma_B$  і плинності  $\sigma_{02}$ ) та пластичності (відносні подовження  $\delta$  та звуження  $\psi$ ), фрактальних розмірностей структури металу та включень, та пошкодженості металу  $\omega$  для досліджених дротів АК наведені в табл. 4.7.

Слід ще раз підкреслити, що міцнісні характеристики канатів, як і пластичні, залежать в першу чергу від хімічного складу сталі, структури металу (технологія виготовлення), товщини дротів, а також умов експлуатації.

При цьому цікаво відзначити, що канати різних класів можуть мати практично однакові механічні властивості (табл. 4.7.). У той же час канат зі сталі 80 (канат АК1), що займає проміжне значення за змістом вуглецю, має найвищий тимчасовим опором і межею плинності в порівнянні з іншими розглянутими варіантами (табл. 4.1 – 4.5).

Таким чином, для нижньої частини АК1 високі значення межі міцності на розрив супроводжуються різким зниженням характеристик пластичності ( $\delta = 1,4\%$  і  $\phi = 2,3\%$ ), що є істотним відхиленням від вимог ТУ У 00191046.014-95; для нижньої частини АК2 зміна відносного подовження і відносного звуження перевищує 55%, що є неприпустимим відхиленням від технічних вимог; при розриві дротів АК3 має місце протилежна тенденція - зменшення відносного подовження і відносного звуження спостерігається переважно для нижньої частини відносно місця розриву. Нестабільність пластичності проявляється, коли руйнування відбувається по дефекту, що може бути наслідком пошкоджень, що накопичувались в металі поблизу місця розриву при експлуатації канату. Тимчасовий опір АК4 і межа плинності для нижньої і середньої (далеко від місця розриву каната) частин каната не відповідає вимогам, а в разі нижньої частини - розрив супроводжуються деяким зниженням характеристик пластичності ( $\delta = 3,2\%$  і  $\phi = 13,1\%$ ), що також є відхиленням від вимог ТУ У 00191046.014-95.

Для аналізу результатів була введена величина пошкоджуваності [107], яка в свою чергу, є процесом різкого вираження і нерівномірного змінення геометричного стану поверхонь, структури і їх властивостей [24-26]. Для підрахунку його введено поняття модуля Юнга через властивості напруження (межі міцності):

$$E = \frac{\sigma_B}{\varepsilon} \quad - \text{поточний модуль} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \delta \cdot 100\% \quad (4.2)$$

$$\omega = 1 - \sqrt{\frac{E}{E_0}}, \quad (4.3)$$

де  $E_0 = 200$  ГПа (табличне значення для сталі) – модуль пружності неушкодженого матеріалу.

Також, виявлено зв'язок фрактальної розмірності і середніх значень механічних характеристик міцності (границь міцності  $\sigma_B$  і плинності  $\sigma_{02}$ ) зображених на рис.4.3.

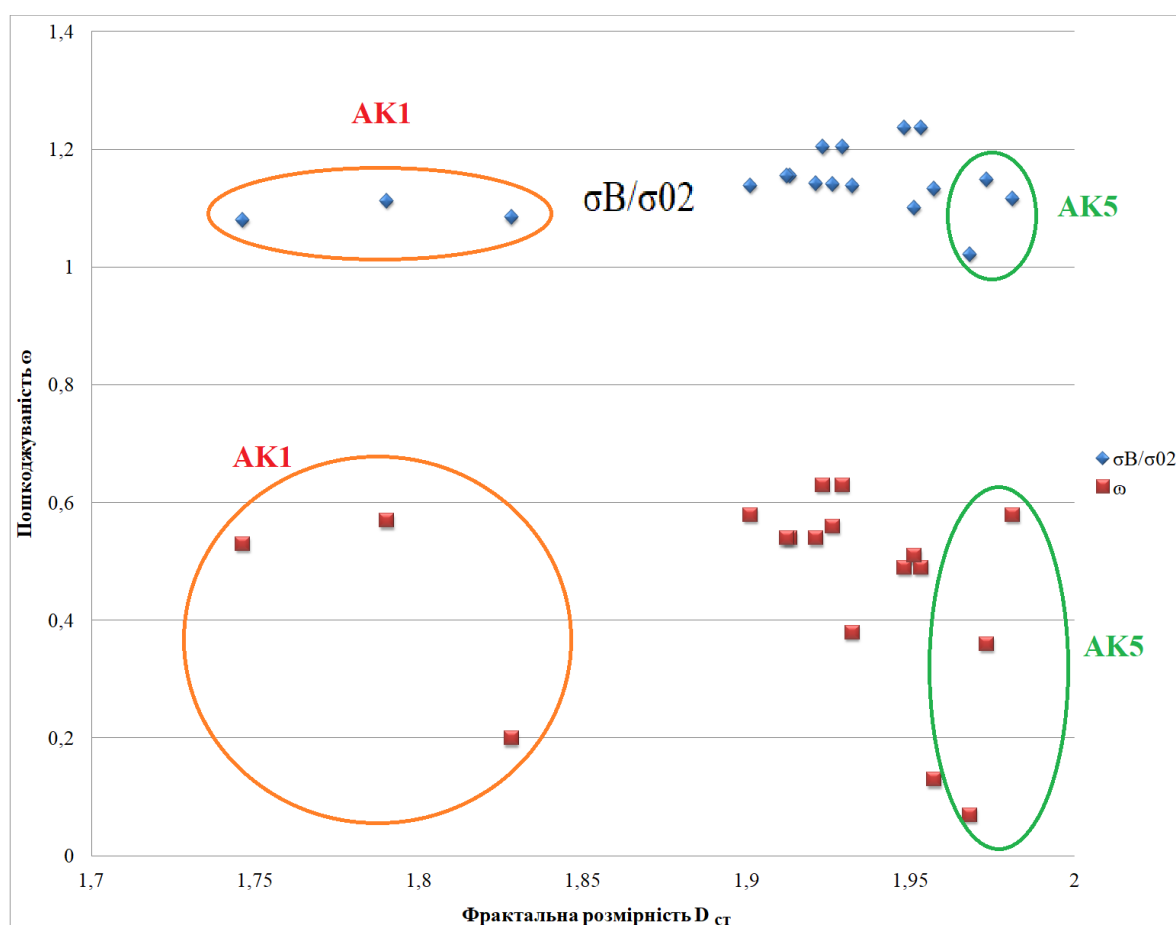


Рис. 4.3. Залежності різного роду для різних марок сталі (70, 80,85)

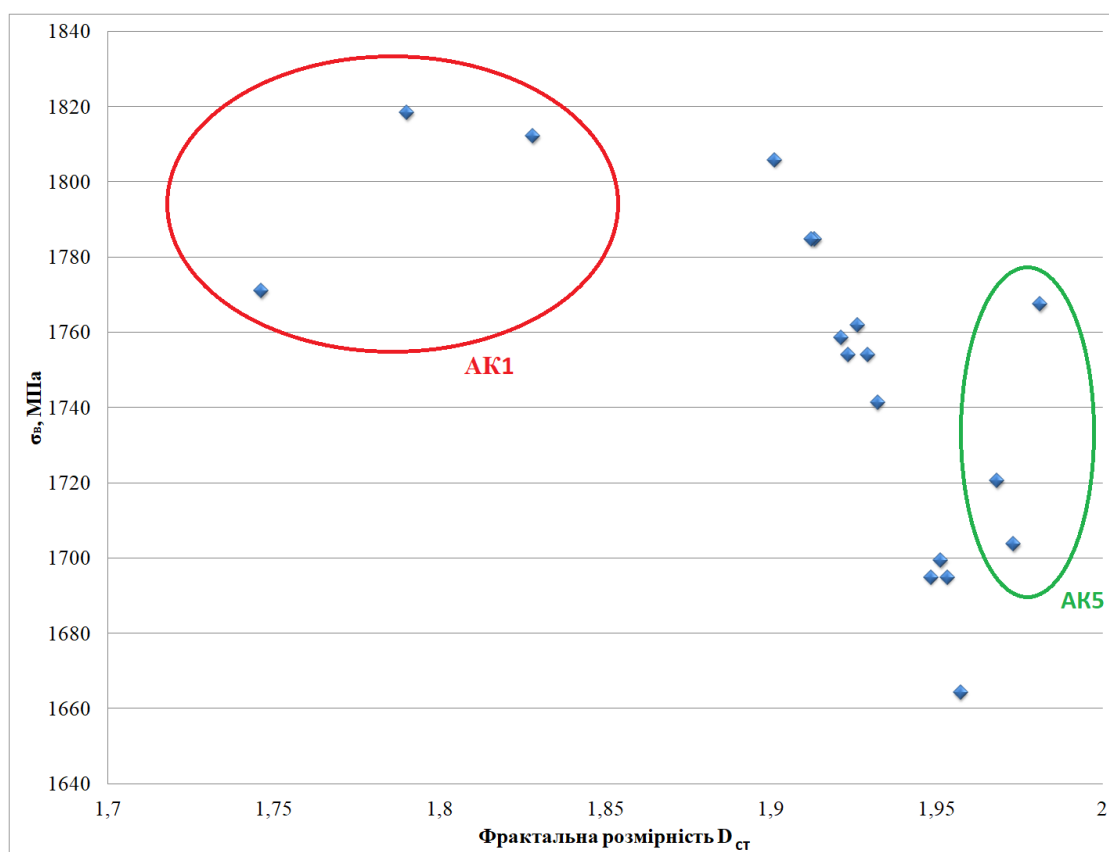


Рис. 4.4. Межі міцності від фрактальної розмірності структури

Таким чином, в досліджених експлуатаційних зламах канатів, задіяних в захисних оболонках атомного реактора, виявлено певний зв'язок між особливостями руйнування, пов'язаними з пошкодженістю, і показниками фрактальних розмірностей, а саме: більш крихкому руйнуванню відповідає вище значення фрактальної розмірності з меншим показником пошкодженості матеріалу. Іншими словами, виявлено тенденцію зменшення фрактальної розмірності, що відповідає більшій пластичності металу і навпаки (табл. 4.7). Співставлення механічних характеристик досліджених канатів зі знайденою згідно із співвідношенням (4.3) величиною пошкодженості  $\omega$ , показало, що показник пошкодженості був найменшим для металу з найнижчою пластичністю (табл. 4.7). Це може бути пов'язано з більш крихким характером руйнування відповідних ділянок канатних дротів. Якщо інтерпретувати пошкодженість як співвідношення площі зламу, що припадає на мікропори і мікротріщини, до номінальної площі перерізу зразка, то пошкодженість за

крихким руйнуванням пов'язують з дефектами, утвореними без макроскопічних пластичних деформацій.

#### **4.2 Металографічні дослідження зразків балонної сталі: ДС, 35Г / 40Г і сталі 20 методом фрактального аналізу.**

Металографічні дослідження зразків вимагають достатньої уваги при виборі зразків, підготовці - шліфування, полірування, травленню, а також при вивченні структури [46]. Для дослідження структури металів і її впливу на їх властивості широко використовуються традиційні методи макро- і мікроаналізу [155]. Також, на ряду з традиційними методами представлений метод фрактального аналізу, який дозволяє оцінити мікро-, макрофотографій структури з введенням величини фрактальної розмірності. Фрактальна розмірність вперше була введена Мандельброт і застосована до вивчення поверхні руйнування металу [2, 3]. Метод фрактального аналізу успішно використовувався при дослідженні процесів тріщиноутворення в металах і сплавах [22].

Методи фрактальної геометрії виявилися ефективними при аналізі явищ самоорганізації в дисипативних системах і дозволили пов'язати зміни фрактальної розмірності з властивостями металу [156].

У даній роботі проводиться вивчення металографічної картини структури зразків і її фрактальної розмірності. Зразки були вирізані з декількох місць об'єктів з балонної сталі Дс, 35Г / 40Г, 20. Було використано два типи зразків - зразок Dі з місця без деформації / с мінімальною деформацією, зразок Wі з місця з деформацією. Всі зразки виготовляли за стандартною методикою із застосуванням алмазних паст різної дисперсності. Далі вони були досліджені на «забрудненість» - зміст неметалічних включень. Вирішальне значення при вивченні впливу неметалевих включень на якість сталі мають їх властивості: розмір, форма, хімічні і фізичні характеристики, а також характер розташування по відношенню до зерен литого металу. Зазначені властивості включень залежать від хімічного складу сталі, способу її виплавки і для заданої



марки сталі можуть змінюватися в широких межах навіть для однакового способу її виробництва.

Основний метод контролю вмісту включень - аналіз за допомогою світлової мікроскопії макро- і мікрошліфів певного розміру і місця вирізки. Підрахунок і визначення розмірів проводять вручну. Металографічне дослідження проводили на мікроскопі "Neophot-32" при різних збільшеннях. Для виявлення мікроструктури проводилося хімічне травлення в 4% розчині азотної кислоти в спирті.

Неметалеві включення виникають у результаті цілого ряду фізико-хімічних явищ, що протікають у розплавленому металі та металі, який твердіє у процесі його виробництва. Неметалеві включення у сталі є чужорідними тілами, що порушують однорідність її структури, тому їх вплив на механічні та інші властивості може бути значним.

Оцінка забрудненості неметалічних включень металу зразків проводилась згідно ГОСТ 1778-70 «Сталь. Металеві методи визначення неметалічних включень» [157] шляхом порівняння з еталонними шкалами на полірованої нетравленої поверхні шліфа при збільшенні 100.

Були вирізані 12 зразків, які на першому етапі досліджували по одній з осей – площина перпендикулярна вісі (рис.4.5) на неметалеві включення.

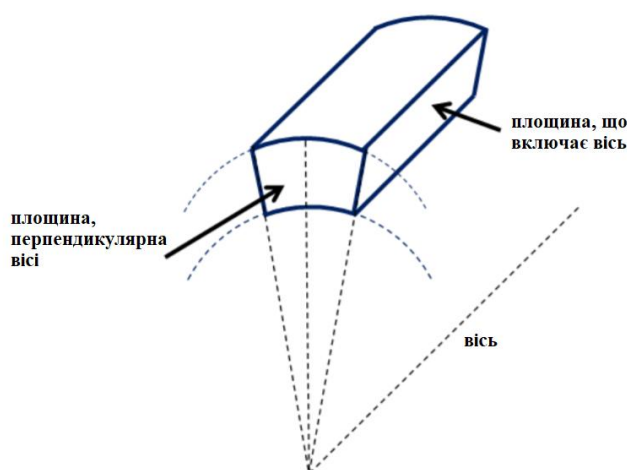


Рис. 4.5. Дослідження вирізаного зразка з однієї зі сторін.

З паспорта даних об'єкта були взяті результати спектрального аналізу, представлені заводом виробником (таблиця 4.8), а також дані отримані в лабораторії хімічного аналізу інституту електрозварювання ім. Е. О. Патона НАН України (таблиця 4.9).

Таблиця 4.8.

**Результати спектрального аналізу металу зразків (стандарт)**

Массовая доля в процентах									Сталь
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	
0,43-0,53	0,17-0,37	0,7-1,0	<0,045	<0,045	< 0,35	<0,25	-	-	Д, Дс, ТУ 14-157-15
0,32-0,40	0,17-0,37	0,7-1,00	<0,035	<0,035	<0,30	<0,30	<0,30	-	35Г, ГОСТ 4543-71
0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	<0,040	<0,035	<0,25	<0,30	<0,30		20, ГОСТ 1050-88

З об'єктів із баланої сталі були вирізані зразки на яких проведено спектральний аналіз і порівнений із даними ГОСТу (табл.4.8, табл.4.9).

Для одного з зразків (D3) методом фрактального аналізу була підрахована фрактальна розмірність при різних збільшеннях (рис.4.6).

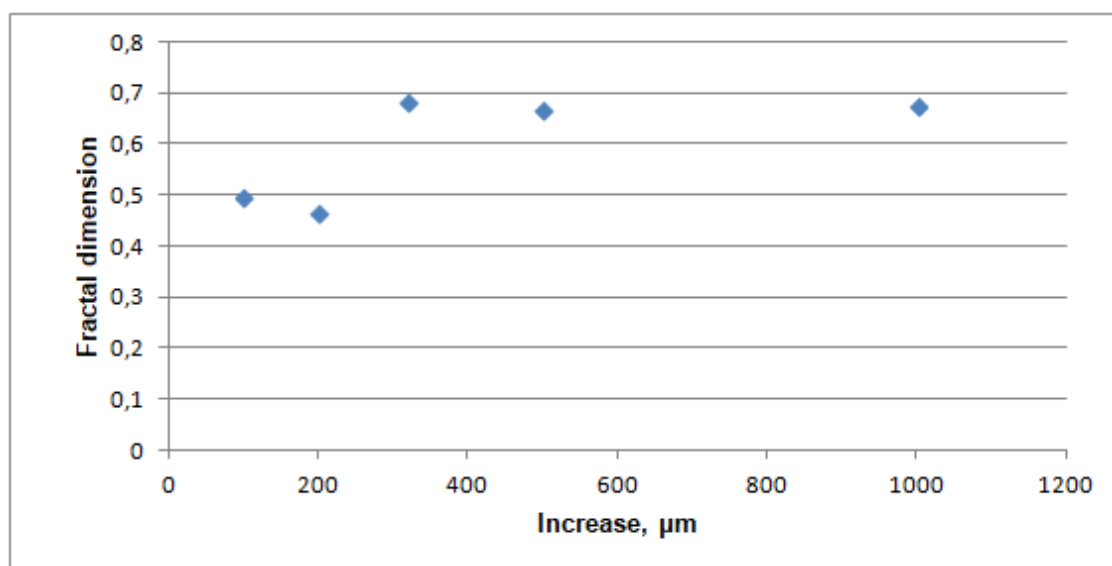


Рис.4.6. Залежність фрактальної розмірності від збільшення структури зразка.

Ці дані дають чітку картину діапазонів, в яких фрактальна розмірність інваріантна, відповідно для порівняльних характеристик варто працювати з зображеннями, зробленими при однакових збільшеннях.

Таблиця 4.9.

**Результати спектрального аналізу металу зразків  
(експериментальні дані)**

Массовая доля в процентах										Сталь/Зразок
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo		
0,512	0,512	0,336	0,54	0,027	0,014	0,140	0,128	0,362		Дс/D <sub>1</sub> W <sub>1</sub>
0,563	0,563	0,311	0,84	0,032	0,009	0,117	0,150	0,169		Дс/D <sub>2</sub> W <sub>2</sub>
0,40	0,40	0,32	0,94	0,023	0,030	<0,1	0,05	0,056	<0,05	35Г(40Г)/D <sub>3</sub> W <sub>3</sub>
0,36	0,36	0,32	0,85	0,025	0,017	0,073	0,027	0,045	0,009	35Г/D <sub>4</sub> W <sub>4</sub>
0,19	0,19	0,29	0,54	0,02	0,011	0,07	0,05	0,08		20/D <sub>5</sub> W <sub>51</sub> W <sub>52</sub> W <sub>52</sub>

Далі зразок був зашліфований, отпалірован, проведена оцінка неметалічних включень і отримані фотографії при збільшенні 200 для дослідження на «забрудненість» та підраховані фрактальні розмірності (табл.4.10).

Таблиця 4.10.

**Дані фрактальних розмірностей для кожного зразка.**

Зразок	D <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	W <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	W <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	W <sub>51</sub>	W <sub>52</sub>	W <sub>53</sub>
D	0,482	0,397	0,382	0,464	0,498	0,254	0,538	0,444	0,302	0,558	0,715	0,506

Забрудненість неметаллическими включеннями по ГОСТ 1778-70 представлена нижче:

**Зразок D1.** Основна маса включень - точкові оксиди, забрудненість якими відповідає балу №1 ряду "а" за шкалою оксиди точкові. Необхідно відзначити, що на кромці зразка з одного боку кількість оксидів цієї груп збільшено до балу 3а-4а. Також спостерігаються такі види включень:

Сульфіди, витягнуті уздовж прокату бала 2б (іноді 3б) за шкалою сульфіди строчечного

Сульфіди ниткоподібної форми, видимі про великих збільшеннях (x1000)

Сульфіди з вкрапленнями оксидів - оксісульфіда

Дисперсні силікати глобулярної форми в невеликій кількості

Оксиди строчечного - бал 0, іноді 1а (рідко)

### **Зразок W1.**

Оксиди точкові бал 1а по центру зразка і 3а-4а - на кромці.

Оксиди строчечного - бал 0, іноді 1а (рідко)

Сульфіди строчечного - 3б

Сульфіди з вкрапленнями оксидів, сульфіди ниткоподібної форми

Дісперсние силікати глобулярної форми в невеликій кількості

### **Зразок D2.**

Оксиди точкові - бал 1а

Оксиди строчечного - 0 (рідко 1а)

Сульфіди строчечного - 3 б

Сульфоди ниткоподібної форми (x1000)

оксісульфіда

Дисперсні силікати глобулярної форми в невеликій кількості

### **Зразок W2.**

Оксиди точкові - бал 1а

Оксиди строчечного - менш бала 1а ( "0")

Сульфіди строчечного - 3б

Сульфіди ниткоподібної форми (x1000)

оксісульфіда

Силікати глобулярні-дисперсні, рідко

**У зразках D3, W3, D4, W4 (35Г / 40Г)** виявлені складні сульфіди заліза і марганцю, витягнуті уздовж прокату. Цей тип включень є переважаючим. Також зустрічаються оксиди у вигляді рядків і окремого розташування. При

великому збільшенні (х500-1000) виявлені сульфідні ниткоподібної форми, оксисульфідні і дисперсні включення глобулярних силікатів.

#### **Зразок D3.**

Оксиди точкові - бал менше 1а ( "0")

Оксиди строчечного - 2а (ланцюжки оксидів)

Сульфідні строчечного 3а-3б (іноді 4а)

#### **Зразок W3.**

Оксиди точкові - бал менше 1а

Оксиди строчечного - 2б (іноді 3а)

Сульфідні строчечного - 2б (іноді 3а)

#### **Зразок D4.**

Оксиди точкові - менш 1а

Оксиди строчечного - 2а

Сульфідні строчечного 3б

Необхідно відзначити, що в цьому зразку оксисульфідів практично не спостерігається.

#### **Зразок W4.**

Оксиди точкові - менш 1а

Сульфідні строчечного - 3б

Оксиди строчечного - 1а (ланцюжки оксидів)

#### **Опис неметалічних включень зразків D5, W51, W52, W53 (сталь 20)**

Основну масу складають включення оксидів рівномірного розташування. Також виявлені оксисульфідні і сульфідні, витягнуті уздовж прокату, в невеликій кількості глобулярні силікати і ідінічні нітриди і оксинітриди правильної геометричної форми. Оксиди строчечного не виявлені.

#### **Зразок D5.**

Оксиди точкові - бал 3а по центру і 4а по краю

Сульфідні строчечного - 1а

#### **Зразок W51.**

Оксиди точкові - 2а (іноді 3а)

Оксиди строчечного - 1б - рідко і в самих "забруднених" місцях сульфідів строчечного - 1а-менш ("0")

### Зразок W52.

Оксиди точкові - бал 3а

Сульфідів строчечного - 1а

### Зразок W53.

Дуже "чистий" по неметалевих включень. Забрудненість за всіма видами включень менш, ніж в Гості.

При  $\times 500-1000$  виявлені дисперсні оксиди, глобулярні силікати, оксисульфідів.

Було проведено комплекс випробувань і аналітичних заходів, спрямований на вивчення макро- і мікроструктури металів.

Були отримані: спектральний аналіз зразків (табл. 4.9), залежність фрактальної розмірності від збільшення (рис. 4.6), підраховані фрактальні розмірності (табл. 4.10), проведено пошук взаємозв'язку фрактальної розмірності від неметалевих включень (рис.4.7, рис.4.8), а також залежність фрактальної розмірності від товщини стінки.

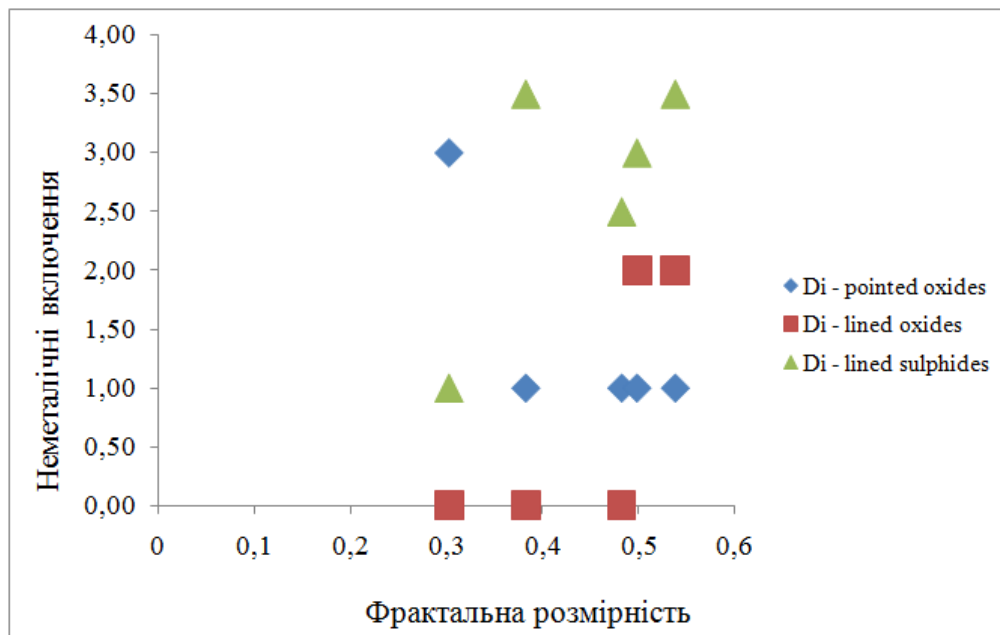


Рис.4.7. Взаємозв'язок фрактальної розмірності з показниками неметалічних включень для зразків Dі з місця без деформації / с мінімальною деформацією

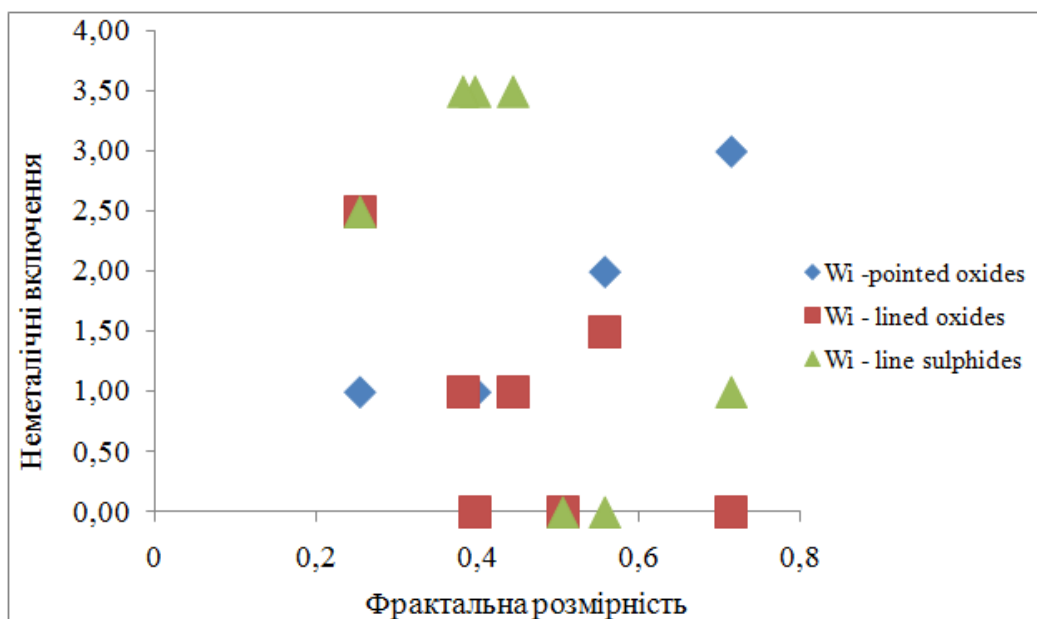


Рис.4.8. Взаємозв'язок фрактальної розмірності з показниками неметалічних вклюджень для зразків Wi з місця з деформацією

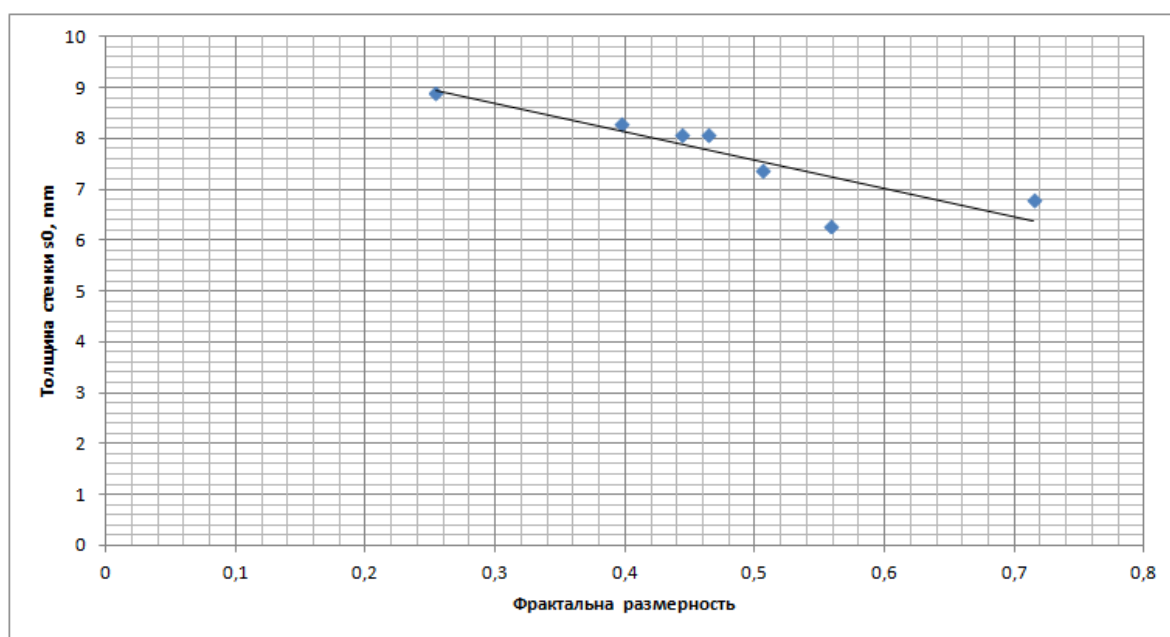


Рис.4.9. Взаємозв'язок товщини стінки і фрактальної розмірності.

Отже, фрактальна розмірність змінюється в залежності від неметалевих вклюджень для різних металів, але вимагає більш ретельного підходу; фрактальна розмірність зменшується при збільшенні товщини стінки; при різних збільшеннях спостерігається невелика зміна фрактальної розмірності, але для більш точних досліджень слід використовувати одне збільшення для пошуку взаємозв'язків.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Отримано експериментальні результати щодо взаємно однозначної відповідності між якісними характеристиками досліджуваного металу і фрактальною розмірністю його мікроструктури та включень. Так для оцінки експлуатаційних пошкоджень в сталевих конструкціях, зокрема в армокантах АЕС було застосовано підхід мультифрактальної параметризації, головним досягненням якого було підтвердження існування взаємно однозначної відповідності між фрактальною розмірністю мікроструктури металу та його кількісними характеристиками.

2. Виявлено залежність фрактальної розмірності і середніх значень механічних характеристик міцності (границь міцності  $\sigma_B$  і плинності  $\sigma_{0.2}$ ), а також зв'язок між характером руйнування досліджених дротів залежно від пошкодженості металу і фрактальною розмірністю: крихкіший злам характеризується нижчим значенням фрактальної розмірності.

3. Досліджено, що фрактальна розмірність змінюється в залежності від неметалевих включень для різних металів, це вимагає більш ретельного підходу – введення поняття мультифракталу, а отже комплексна діагностика методом фрактального аналізу для структури, для включень, для еталонних картин структур.

4. З'ясовано, що фрактальна розмірність зменшується при збільшенні товщини стінки, при різних збільшеннях спостерігається невелика зміна фрактальної розмірності, але для більш точних досліджень слід використовувати одне збільшення для пошуку взаємозв'язків.

**Результати експериментальних досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:**

1. V. M. Torop, M. D. Rabkina, O. O. Shtofel', V. V. Usov, N. M. Shkatulyak, O. S. Savchuk. On the Causes of Fractures of Reinforcing Ropes of the Protective Shells of Power-Generating Units of Nuclear Power Plants. Materials Science, 2018. - Volume 54, Issue 2, pp 240–249.



2. Штофель О. О., Чижська Т. Г. Підготовка металевого зразка до вивчення його мікроструктури методом фрактального аналізу. - Інноваційні вектори розвитку сучасних наукових досліджень: XXI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція: тези доповідей, Харків, 11 жовтня 2019 р. – Ч. 1. – Дніпро: ГО «НОК», 2019 – с. 48-54
3. Olga Shtopfel, Marjana Rabkina ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДО ВИВЧЕННЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ. Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування 58 (2), 2019 – с. 28-33.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлений вплив структурних і магнітних чинників на фрактальні характеристики поверхонь руйнування. Встановлена слабка залежність фрактальної розмірності від товщини стінки, проте явна залежність із коерцитивною силою;

2. Встановлено кореляційні залежності середньої фрактальної розмірності меж зерен з ударною в'язкістю  $KCV$  при  $-10^{\circ}\text{C}$  і  $20^{\circ}\text{C}$ , руйнівним тиском, а також межами плинності  $\sigma_{0,2}$  і міцності  $\sigma_B$ .

3. Встановлено, що взаємозв'язок між фрактальними розмірностями кривих, які включають як стадію зародження, такі стадію розповсюдження руйнування та відповідними розмірностями поверхонь руйнування зразків, має різний характер: лінійну залежність мають лише зразки, вирізані під кутом  $45^{\circ}$ ; для повздовжнього напрямку, а також для зразків, вирізаних поперечно залежність має поліноміальний вид другого порядку.

4. Встановлено, що різні типи залежностей фрактальних розмірностей кривих загального руйнування і відповідних поверхонь зламів в зразках, які існують в різних напрямках (повздовжньо, поперечно та під кутом  $45^{\circ}$ ), можуть свідчити про ознаки анізотропії і вплив анізотропії прокату відбивається лише на стадії розвитку руйнування, що має бути враховано при виборі матеріалу відповідного призначення.

5. Виконано металографічні дослідження зразків сталей різного хімічного складу. Досліджено мікроструктуру зразку та наявність включень, а також зв'язок фізико-механічних характеристик із фрактальною розмірністю.

6. Встановлено, що в досліджених експлуатаційних зламах канатів, задіяних в захисних оболонках атомного реактора, виявлено певний зв'язок між особливостями руйнування, пов'язаними з пошкодженістю, і показниками фрактальних розмірностей, а саме: для сталі 70 (фрактальна розмірність структури лежить у межах 1.97-2.00, для сталі 80 – у межах 1.74-1.83, та сталі 85 – 1.9-1.95. Встановлено, що більш крихкому руйнуванню відповідає вище

значення фрактальної розмірності з меншим показником пошкодженості матеріалу.

7. Встановлено, що фрактальна розмірність змінюється в залежності від неметалевих включень для різних металів. Доведено, що для коректного аналізу металічних об'єктів необхідним є введення поняття мультифракталу, яке дає можливість виконання комплексної діагностики методом фрактального аналізу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека «Техническая диагностика вчера, сегодня и завтра». Техническая диагностика и неразрушающий контроль, № 4, 2003, 10с.
2. B. Mandelbro, *Fractal Geometry of Nature*. New York (NY): W.H. Freeman and Co., (1983), ISBN-13: 978-0910321648
3. Mandelbrot B.B. Self-affine fractals and fractal dimension. *Phys. Phys. Scr.*, 1985. N32. P. 257- 260.
4. Mandelbrot B.B.; Passoja, D.E.; Paullay, A.J. Fractal character of fracture surfaces of metals. *Nature*, 1984. Vol. 308. N. 19. P. 721-722.
5. Барретт Ч.С. Структура металлов. Кристаллографические методы, принципы и данные Издание первое: Перевод под ред. Я.С.Уманского. – М.: Металлургиздат, 1948. – 678 с.
6. Приготовление образцов для металлографического исследования микроструктуры. Методические материалы к выполнению лабораторных работ по металлографии Учебное пособие. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. –18 с.
7. Салтыков, А. И. Стереометрическая металлография [Текст] / А. И. Салтыков. 3-е изд., – М.: Металлургия, 1970. – 376 с
8. C.S. Barrett, T.B. Massalski, *Structure of Metals*, 3rd revised edition. New York (NY), Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt/M: Pergamon Press Oxford, (1980). ISBN-13: 978-0080261720
9. Белоус М.В., Барабаш Р.И., Егоров Б.В. Физика металлов. / Учеб. Пособие МИН ВУЗ УССР // Киев, Вища школа, 1992. - 352 с.
- 10.А. П. Гуляев, *Металловедение: Учебник для вузов*, Москва, РФ: Металлургия, 1986
- 11.Hatch T., Choate S.P. Statistical description of the size properties of non-uniform particulate substances. *J. Franklin Inst.* 1929, 207: 369-387

12. М. Е. Блантер. Методика исследования металлов и обработки опытных данных. — Москва: Металлургиздат, 1952. — 444 с.
13. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы [Текст] / Б. Мандельброт — М: Институт компьютерных исследований, 2002. — 656 с. — URL:  
[https://kpfu.ru/portal/docs/F845951572/Igudesman.\\_Fraktalnaya.geometriya.pdf](https://kpfu.ru/portal/docs/F845951572/Igudesman._Fraktalnaya.geometriya.pdf)
14. Вовк Я. С., Ляхман А. В., Штофель О. О. Метод фрактального аналізу як сучасний підхід до вивчення структури металлу, Розвиток сучасної науки: теорія, практика, інновації: XV Міжнародна науковопрактична інтернет-конференція: тези доповідей, Дніпро, 29 березня 2019 р. — Ч. 1. — Дніпро: ГО «НОК», 2019.
15. О. А. Штофель, М. Д. Рабкина, “Использование мультифрактального анализа для оценки свойств конструкционных сталей”, *Universum: Технические науки: электрон. научн. журн.* № 10(31), 2016.
16. Е. Федер, *Фракталы* М., Мир, 1991.
17. Волчук В.Н. О применении вейвлетно-мультифрактального анализа в задаче оценки структуры металла // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури* // Выпуск 9 (210) - С. 24-30 / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/download/56591/52770>. (дата обращения: 28.09.2016).
18. Bunde, S. Havlin, *Fractals and Disordered Systems*. Heidelberg: Springer, (1991), ISBN: 0-387-54070-9
19. Иванова В.С., Кузеев И.Р., Закиричная М.М. Синергетика и фракталы. Универсальности механического поведения материалов. — Уфа: Изд-во УГНТУ, 1998. — 363 с. ISBN 5-7831-0190-7
20. Синергетика и фракталы в материаловедении [Текст] / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксагоев. — М.: Наука, 1994. — 383 с.

- 21.ГОСТ 8233-56. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. Сталь. ЭТАЛОНЫ МИКРОСТРУКТУРЫ. Steel. Microstructure standards. Электронный ресурс <http://docs.cntd.ru/document/gost-8233-56>
- 22.ГОСТ 5639-82. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ.СТАЛИ И СПЛАВЫ. Методы выявления и определения величины зерна. Steels and alloys. Methods for detection and determination of grain size Электронный ресурс <http://docs.cntd.ru/document/gost-5639-82>
- 23.ШтофельО.О. Застосування методу фрактального аналізу до вивчення структури металу. Науково технічний журнал МЕТАЛОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МЕТАЛІВ, 2019 - Tom 91, No. 3, сс. 40-46 (Google Scholar) <https://doi.org/10.15407/mom2019.03.040>
- 24.Штофель О.А. Метод фрактального анализа для оценки структуры конструкционных сталей // XVI международная заочная научно-практическая конференция: «Развитие науки в XXI веке» 1 часть, г. Харьков: сборник со статьями (уровень стандарта, академический уровень). – Х.: научно-информационный центр «Знание», 2016. – С. 54-56.
- 25.Антипов О.И. Фрактальные методы анализа и прогнозирования для самоорганизованных технических, биологических и экономических систем/ Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук: 01.04.03 – Радиофизика. — Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики. — Самара, 2011. — 32 с.
- 26.Беляев А.В. Прогнозирование твердости сварных соединений деталей машин на основе параметризации структур: дис. ... канд. техн. наук. — Казань, 2011. – С. 16-82.
- 27.Иванова В.С., Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. М.: Наука, 1992. 155 с.
- 28.Анваров А.Д. Методика оценки ресурса безопасной эксплуатации оборудования химических производств на основе методологии

- мультифрактальной параметризации: дис. ... канд.техн. наук : 05.26.03. – Казань: РГБ, 2007. – С. 118-123 (Из фондов Российской Государственной Библиотеки). / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://diss.rsl.ru/diss/07/0125/070125026.pdf>. (дата обращения: 03.06.2016).
- 29.Р. М. Кроновер, “Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. Учебное пособие”, Москва, РФ: Постмаркет, 2000
- 30.ГОСТ 949-73 Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на  $P(p) \leq 19,6$  МПа (200 кгс/кв. см). Технические условия (с Изменениями N 1-5) Электронный ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/1200001921>
- 31.ДСТУ 8540:2015. Національний стандарт України. Прокат листовий гарячекатаний. Сортамент. Київ: ДП “УкрНДНЦ”, 2016 Электронный ресурс: [http://www.mdgr.com.ua/content/files/manualfile\\_file/dstu\\_8540-2015.pdf](http://www.mdgr.com.ua/content/files/manualfile_file/dstu_8540-2015.pdf)
- 32.ГОСТ 14959-79 Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические условия. Электронный ресурс: <https://internet-law.ru/gosts/gost/3921/>
- 33.Л.М. Лобанов, В.И. Пивторак, В.В. Савицкий, Г.И. Ткачук «Определение остаточных напряжений в элементах конструкций на основе применения электронной спекл-интерферометрии и метода конечных элементов». Техническая диагностика и неразрушающий контроль, № 4, 2006, 5с.
- 34.ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов, Электронный ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/gost-18353-79>
- 35.Влияние пластической деформации на структуру, механические свойства и коэрцитивную силу металла кислородных баллонов / Л.М. Лобанов, В.А. Нехотящий, М.Д. Рабкина, В.А. Костин, В.В. Харченко, Е.А. Кондряков, В.В. Усов, Н.М. Шкатуляк // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2011. — № 4. — С. 14-23. — Бібліогр.: 17 назв. — рос.

- 36.ГОСТ 30415-96 "СТАЛЬ. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры магнитным методом" Электронный ресурс: [http://www.snr-ndt.com/files/GOST\\_30415-96.pdf](http://www.snr-ndt.com/files/GOST_30415-96.pdf)
- 37.Магнитный контроль и структурно-текстурные особенности металла кислородных баллонов / Л.М. Лобанов, В.А. Нехотящий, М.Д. Рабкина, А.А. Перепичай, В.В. Белосточный, А.В. Белосточный, В.П. Чижиченко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2011. — № 1. — С. 7-12. — Бібліогр.: 14 назв. — рос.
- 38.Оценка усталостного состояния и остаточного ресурса сварных соединений неразрушающими магнитными методами для обеспечения качества сварных конструкций и изделий / Л. М. Лобанов, Ю. К. Бондаренко, Г. Я. Безлюдько, А.Ю. Бондаренко // Докл. 54-й Ежегодной конф. Международного института сварки (Словения), 2001, июль.
- 39.Анизотропия коэрцитивной силы и текстура деформируемой стали / Л. М. Лобанов, В. А. Нехотящий, М. Д. Рабкина и др. // Деформация и разрушение материалов. —2010. — № 10. — С. 19–25.
- 40.ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. Электронный ресурс: <https://www.internet-law.ru/gosts/gost/4616/>
- 41.ISO 14556:2000 Сталь. Испытание на ударную прочность по Шарпи образцов с V-образным надрезом. Инструментальный метод испытания Электронный ресурс: [https://standartgost.ru/g/ISO\\_14556:2000](https://standartgost.ru/g/ISO_14556:2000)
- 42.ISO 14556:2015. Metallic materials - Charpy V-notch pendulum impact test – Instrumented test method. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14556:ed-2:v1:en>
- 43.Tanguy B. Experimental analysis of Charpy V-notch specimens / Tanguy B., Piques R., Pineau A. // Charpy Centenary Conference, 2-5 October 2001. - Poitiers, France, 2001. - P. 425-432.
- 44.Система измерения деформаций и усилий при динамических испытаниях материалов / Е. А. Кондряков, В. Н. Жмака, В. В. Харченко, Л. И.



- Бабуцкий, С. В. Романов // Пробл. прочности. - 2005. - № 3. - С. 140-145.  
- Библиогр.: 6 назв. - рус.
45. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.Н. Материаловедение. Учебник для ВУЗов технич. спец. – 3-е изд. – М. Машиностроение, 1990. – 528с.
46. Штофель О. О., Чижська Т. Г. Підготовка металевого зразка до вивчення його мікроструктури методом фрактального аналізу. - Інноваційні вектори розвитку сучасних наукових досліджень: XXI Міжнародна науково-практична інтернетконференція: тези доповідей, Харків, 11 жовтня 2019 р. – Ч. 1. – Дніпро: ГО «НОК», 2019 – с. 48-54
47. Трофимова Т.И. Курс физики. -20-е изд., стер. М.: Изд-во «Академия», 2014. – 560 с
48. TEXTURE, MICROSTRUCTURE, AND FRACTAL FEATURES OF THE LOW-CYCLE FATIGUE FAILURE OF THE METAL IN PIPELINE WELDED JOINTS Usov V.V., Shkatulyak N.M., Cherneva T.S., Gopkalo E.E., Gopkalo A.P. Russian metallurgy (Metally). 2015. Т. 2015. № 9. С. 759-770.
49. ТЕКСТУРООБРАЗОВАНИЕ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ С КУБИЧЕСКОЙ РЕШЕТКОЙ ПРИ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ Усов В.В., Шкатуляк Н.М., Брюханов П.А., Бейгельзимер Я.Е. Физика и техника высоких давлений. 2011. Т. 21. № 3. С. 102-109.
50. ISO10863:2020 Non-destructive testing of welds — Ultrasonic testing — Use of time-of-flight diffraction technique (TOFD) , Електронний ресурс: <https://www.iso.org/ru/standard/75443.html>
51. Л.М. Лобанов и др. «Сварочные строительные конструкции» Том 3. Арматура и закладные детали, конструкции из пластмасс, реконструкция и оптимизация, контроль качества. Охрана труда. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 2003, 378с.
52. Usov V. V. Fractal nature of the brittle fracture surfaces of metal / V. V. Usov, N. M. Shkatulyak // Materials Science. – 2005. – Vol. 41, No. 1. – P. 62 – 66.
- URL:

<https://www.researchgate.net/publication/226818869> Fractal Nature of the Brittle Fracture Surfaces of Metal

53. Метод фрактального анализа для оценки структуры конструкционных сталей О. А. Штофель – Знание, 2016.
54. С.В.Божокин, Д.А.Паршин Фракталы и мультифракталы. М.2001
55. E. Eisenberg, A. Bunde, S. Havlin, H.E. Roman Range of multifractality for random walks on random fractals // Phys. Rev. E. -1993. V. 47. - P.2333.
56. A.L. Barabasi and T. Vicsek Multyfractality of self-affine fractals // Phys. Rev. 1991. -V. A44. -P. 2730-2733.
57. Fractal dimension of grain boundaries and mechanical properties of the metal of oxygen cylinders / V. V. Usov, M. D. Rabkina, N. M. Shkatulyak, T. S. Cherneva // Materials Science. – 2015. – Vol. 50, No. 4. – P. 612-620. – URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/13593>
58. Пайтген Х.-О., Рихтер П.Х., Красота фракталов, М., Мир, 1993.
59. Аникина, В. И. Фрактография в материаловедении [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В. И. Аникина, А. А. Ковалева. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 144 с. - ISBN 978-5-7638-3114-6.
60. Эндрю Троелсен. Язык программирования C# 5.0 и платформа .NET 4.5, 6-е издание = Pro C# 5.0 and the .NET 4.5 Framework, 6th edition. — М.: «Вильямс», 2013. — 1312 с. — ISBN 978-5-8459-1814-7.
61. Усов В.В., Рабкіна М.Д., Шкатуляк Н.М., Чернева Т.С. Фрактальна розмірність меж зерен і механічні властивості металу кисневих балонів. – Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2014, № 4. – С. 117 – 124.
62. Циллис К. Об измерении фрактальных размерностей по физическим свойствам. // В сб. статей «Фракталы в физике». — М.: Мир, 1988.
63. Bobyr M. Phenomenological damage models of anisotropic structural materials / M. Bobyr, O. Khalimon, O. Bondarets // Journal of mechanical engineering NTUU «Kyiv Polytechnic Institute»/ – 2013. – Серія Машинобудування №67. – С. 1-13. – URL: <http://journal.mmi.kpi.ua/old/article/view/37390/34154>

64. В. Tanguy, R. Piques, A. Pineau, European Structural Integrity Society. 30, 453, (2002), DOI: 10.1016/s1566-1369(02)80051-6
65. ГОСТ 1778-70 Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. Электронный ресурс [http://gostrf.com/normadata/1/4294835/4294835\\_064.pdf](http://gostrf.com/normadata/1/4294835/4294835_064.pdf)
66. Физико-механические изменения в сталях при эксплуатации в водородосодержащих средах / В.С. Гиренко, М.Д. Рабкина, С.В. Гиренко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2003. — № 4. — С. 18-23. — Библиогр.: 10 назв. — рос.
67. Моделювання можливості розвитку тріщиноподібних дефектів у посудинах тиску з двошарових сталей / І.І. Перепічай, А.О. Перепічай, В.В. Мутас, М.Д. Рабкіна // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2018. — № 2. — С. 63-68. — Библиогр.: 10 назв. — укр.
68. TEXTURE AND COERCIVE FORCE OF THE METAL OF FURNACE TUBE COILS N. M. Shkatulyak , E. A. Dragomeretskaya , V. V. Usov, M. D. Rabkina, A. L. Palienko - Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures Issue 1, 2016
69. КОЭРЦИТИВНАЯ СИЛА, ТЕКСТУРА И РАЗРУШЕНИЕ В ТРУБЕ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ УСОВ В.В., БРОКМАЙЕР Х.Г., ШКАТУЛЯК Н.М1, РАБКИНА М.Д., НЕХОТЯЩИЙ В.А.- МЕТАЛЛЫ Издательство: ООО НПП "ЭЛИЗ" (Москва) - №3, 2012 стр. 40-47, УДК: 669-176:548.4
70. Данилов С. В., Куклина А. А. Текстура горячекатаной электротехнической анизотропной стали [Электронный ресурс] // XV международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлослов-молочных ученых, Екатеринбург, 8–12 декабря 2014 г.: сборник научных трудов. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. – С. 293–295. – URL: <http://hdl.handle.net/10995/29761>.
71. Влияние кристаллографической текстуры на склонность к слоисто-хрупкому разрушению низколегированных малоперлитных сталей / В. В.

- Усов, Н. М. Шкатуляк, В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина, А. В. Бернацкий, А. П. Мусиенко, О. Н. Щербаков // Изв. АН СССР. Металлы. – 1990. – № 1. – С. 120–125.
72. Olga Shtopfel, Marjana Rabkina ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДО ВИВЧЕННЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ. Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування 58 (2), 2019 – с. 28-33.
73. Методы исследования текстур в материалах : учеб.-метод. пособие / М. Л. Лобанов, А. С. Юровских, Н. И. Кардонина, Г. М. Русаков. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 115, [1] с. ISBN 978-5-7996-1107-1
74. Магнитный контроль и структурно-текстурные особенности металла кислородных баллонов Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. НЕХОТЯЩИЙ, М. Д. РАБКИНА, А. А. ПЕРЕПИЧАЙ - Техническая диагностика и неразрушающий контроль, №1, 2011. – с. 7-12.
75. Анализ разрушений и возможности контроля состояния металла кислородных баллонов / В. М. Долинский, В. М. Стогний, В. Г. Новик и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 33–36.
76. Теория образования текстур в металлах и сплавах / Я. Д. Вишняков, А. А. Бабареко, С. А. Владимиров, И. В. Эгиз. – М.: Наука, 1979. – 343 с.
77. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы / Преображенский А. А., Бишард Е. Г. – М.: Высш. шк. – 1986. – 352 с
78. Вонсовский С. В. Магнетизм. / С. В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
79. Горелик С. С. Рентгенографический и электроннооптический анализ / С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. – М.: Металлургия. – 1970. – 366 с.
80. Теория образования текстур в металлах и сплавах / Я. Д. Вишняков, А. А. Бабареко, С. А. Владимиров, И. В. Эгиз. – М.: Наука, 1979. – 343 с.

81. Анизотропия коэрцитивной силы и текстура деформируемой стали / Л.М. Лобанов, В.А. Нехотящий, М.Д. Рабкина, В.В. Усов, Н.М. Шкатуляк // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 10. – С. 19-24
82. Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов и др. "Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений". Киев: Наук.думка, 1981. 584 с.
83. Магнитный контроль напряженно-деформированного ресурса сосудов, работающих под давлением / Б. Е. Попов, Е. А. Левин, В. С. Котельников и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – № 3. – С. 25–30.
84. Влияние пластической деформации на структуру, механические свойства и коэрцитивную силу металла кислородных баллонов / Л. М. Лобанов, В. А. Нехотящий, М. Д. Рабкина и др. // Техн. диагностика и неразр. контроль. – 2011. – № 4. – С. 14–23.
85. Texture, microstructure, and fractal features of the low-cycle fatigue failure of the metal in pipeline welded joints / V. V. Usov, E. E. Gopkalo, N. M. Shkatulyak, A. P. Gopkalo, and T. S. Cherneva // Russian Metallurgy (Metally). – 2015. – Vol. 2015, No. 9. – P. 759–770. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0036029515090128>
86. ФРАКТАЛЬНА РОЗМІРНІСТЬ МЕЖ ЗЕРЕН І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ КИСНЕВИХ БАЛОНІВ В. В. УСОВ , М. Д. РАБКІНА , Н. М. ШКАТУЛЯК , Т. С. ЧЕРНЕВА – Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2014. – <sup>1</sup> 4. – Physicochemical Mechanics of Materials. – с.117-124.
87. Усов В. В., Шкатуляк Н. М. Фрактальная природа дислокационной структуры низколегированной стали контролируемой прокатки // Изв. вузов. Физика. – 2004. – № 11. – С. 42–48.
88. Хільчевський В.В., Кондратюк С.Є., Степаненко В.О., Лопатько К.Г. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. Київ: Либідь, 2002. с.326.

89. ФРАКТАЛЬНА ПРИРОДА АНІЗОТРОПІЇ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕФОРМОВАНИХ МЕТАЛЕВИХ СИСТЕМ З КУБІЧНИМИ РЕШІТКАМИ, Усов В.В – дисертаційна робота д.т.н. 01.04.01 - фізика приладів, елементів і систем - 2002
90. F. Family, T. Vicsek, Dynamics of Fractal Surfaces, Singapore, World Scientific, 1991.
91. HAHN H. The crisis in intuition. The world of mathematics, Newman, Vol. III. New York; Simon & Schuster, 1956-1976. (Перевод с немецкого)
92. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 128 с.
- 93.. Влияние кристаллографической текстуры на склонность к слоисто-хрупкому разрушению низколегированных малоperlитных сталей / В. В. Усов, Н. М. Шкатуляк, В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина и др. // Изв. АН СССР. – 1990. – № 1. – С. 120–125.
94. Кристаллографическая текстура и механические свойства листов стали 09Г2ФБ / Н. П. Лякишев, В. Ф. Шамрай, И. В. Эгиз и др. // Металлы. – 2003. – № 4. – С. 93–100.
95. Штофель О.А., Рабкина М.Д. Фрактальная природа трещин при анизотропии // VIII Міжнародна конференція молодих учених та спеціалістів - Зварювання та споріднені технології. Національна академія наук України, Представництво "Польська академія наук" в м. Києві, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, Рада наукової молоді ІЕЗ ім. Є.О. Патона - Київ, 2015. - С. 223.
96. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов. - М.: Металлургия, 1975. - с. 208.
97. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов - Учебное пособие для вузов. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. - 329 с.
98. Механика разрушения композитных материалов в контексте фрактального анализа. В.И. Дырда, Щелокова. М.А.

99. Chow C. L. An anisotropic theory of elasticity for continuum damage mechanics / C. L. Chow, J. Wang // International Journal of Fracture. – 1987. – Vol. 33, No. 1. – P. 3-16. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00034895>
100. Усов В. В., Шкатуляк Н. М., Гиренко В. С. и др. Влияние кристаллографической текстуры на склонность к слоисто-хрупкому разрушению низколегированных малоперлитных сталей // Изв. АН СССР. 1990. № 1. С. 120-125.
101. АНИЗОТРОПИЯ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ И ТЕКСТУРА ДЕФОРМИРУЕМОЙ СТАЛИ  
Лобанов Л.М., Нехотящий В.А., Рабкина М.Д., Усов В.В., Шкатуляк Н.М., Ткачук Е.Н.  
Деформация и разрушение материалов. 2010. № 10. С. 19-24.
102. Bouchaud E. Fractal dimension of fractured surfaces: a universal value / E. Bouchaud, G. Lapasset, J. Planes // Europhysics Letters. – 1990. – Vol. 13, No. 1. – P. 73–79. – URL: <http://sci-hub.bz/b8e5a456fdd51ab606a445bf304ea675/bouchaud1990.pdf>.
103. Бамбура А. Н., Сазонова И. Р., Богдан В. М. К расчету железобетонных преднапряженных защитных оболочек атомных станций // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2016. – Вып. 91. – С. 25–31.
104. Система обеспечения надежности строительных конструкций АЭС и ТЭС Украины / Н. В. Савицкий, В. Б. Швец, В. Л. Седин, Ю. А. Киричек, Е. А. Бауск, А. Н. Станкевич, А. В. Шавлаков, И. Е. Гевцы, Г. Г. Фаренюк, А. Н. Бамбура // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2012. – Вып. 65. – С. 531–540.
105. Report on Aging of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures. – URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6424/>

106. Bonded or Unbonded Technologies for Nuclear Reactor Prestressed Concrete Containments. – URL: <https://www.oecd-neo.org/nsd/docs/2015/csni-r2015-5.pdf>
107. V. M. Torop, M. D. Rabkina, O. O. Shtofel', V. V. Usov, N. M. Shkatulyak, O. S. Savchuk. On the Causes of Fractures of Reinforcing Ropes of the Protective Shells of Power-Generating Units of Nuclear Power Plants. *Materials Science*, 2018. - Volume 54, Issue 2, pp 240–249.
108. Бергельсон Б.Р. Радиотоксичность и остаточное энерговыделение актиноидов и продуктов деления отработавшего ядерного топлива ВВЭР при длительном хранении отработавшего топлива ВВЭР с повышенным выгоранием / Бергельсон Б.Р., Герасимов А.С., Зарицкая Т.С. [и др.] // *Атомная энергия*. – 2007. – Т. 102. – Вып. 5. – С. 292–296.
109. Lemaître J. Anisotropic damage law of evolution / J. Lemaître, R. Desmorat, M. Sauzay // *Eur. J. Mech. A/Solids*/ – Vol. 19, No. 2.. – 2000. – P. 187-208. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0997753800001613>
110. C. Meneveau and K.R. Sreenivasan The multifractal nature of turbulent energy dissipation // *J. Fluid Mech.* 1991. - V. 224. -P. 429-484.
111. C.L. Berthelsen, J.A. Glazier, S. Raghavachari Effective multifractal spectrum of a random walk // *Phys. Rev. E.* 1994. - V. 49. - P. 1860.
112. Chaboche J.-L. Thermodynamically founded CDM models for creep and other conditions, in: *Creep and damage in materials and structures*, CISM No. 399 (edited by Altenbach H., Skrzypek J. J.), New York: Springer Verlag, 1999. – P. 209-278. – URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7091-2506-9\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7091-2506-9_5)
113. H.G.E. Hentschel Stochastic multifractality and universal scaling distributions // *Phys. Rev. E.* 1994. - V. 50. - P. 243.
114. Holder M., Tsvetkov I. Analysis of the Dow-Jones Industrial Average (DJIA): Index Dynamics by Fractal Analysis Methods. *Proc. of Vth Intern. Congr. of math. modeling. Dubna. 2002. Vol. 2. 150 p.*



115. Ivanov O P and Chernyakov A L 1986 Various regimes of forced propagation of the exothermic reaction front in condensed media *Kvantovaya Elektronika* laser radiation in an inert gas *Kvantovaya Elektronika* 19 910–15
116. J. Drager, A. Bunde Multifractal features of random walks and localized vibrational excitations on random fractals: dependence on the averaging procedures // *Phys. Rev. E*. 1996. - V. 54. - P. 4596.
117. J.A. Glazier, S. Raghavachari, C.L. Berthelsen, M.H. Skolnick Reconstructing phylogeny from the multifractal spectrum of mitochondrial DNA // *Phys. Rev. E*. 1995. - V. 51. - P. 2665.
118. J.F. Muzy, E. Bacry, A. Arneodo The multifractal formalism revisited with wavelets // *Int. J. Bifurcation Chaos*. 1994. - V. 4. - P. 245.
119. K.J. Falconer The geometry of fractal Sets, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1985.
120. K.O. Wiklund, J.N. Elgin Multifractality of the Lorenz system // *Phys. Rev. E*.- 1996.-V. 54.-P. 1111.
121. Luo A. C. J. A large anisotropic damage theory based on an incremental complementary energy equivalence model / A. C. J. Luo, Y. Mou, R. P. S. Han. // *International Journal of Fracture*. – 1995. – Vol. 70, No. 1. – P. 19-34. – <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00018133>
122. P. Kuznetsov, S. P. Kuznetsov, I. R. Sataev Multi-Parameter Transition to Chaos and Fractal Nature of Critical Attractors // *Fractals in the Natural and Applied Sciences*. -1993. P.229-239
123. S.I. Vainshtein, K.R. Sreenivasan, R.T. Pierrehumbert, V. Kashyap, A. Juneja Scaling exponents for turbulence and other random processes and their relationships with multifractal structure // *Phys. Rev. E*. 1994. - V. 50. - P. 1823.
124. Topological properties of percolation clusters S. Havlin, R. Nossal
125. W. Guttinger and D. Dangelmayr, (eds.), *The Physics of Structure Formation*, Berlin, Springer-Verlag, 1987.

126. Wiencek K. Fractal Characterization of Fractured Surfaces of a Steel Containing Dispersed Fe<sub>3</sub>C Carbide Phase / K. Wiencek, A. Czarski, T. Skowronek // Materials Characterization. – 2001. – Vol. 46, No. 2-3. – P. 235 – 238. – URL: [doi:10.1016/S1044-5803\(01\)00129-2](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(01)00129-2)
127. Williford R.E. Scaling Similarities between Fracture Surfaces, Energies, and a Structure Parameter, Scripta Metallurgica, 22, 1749 (1988), URL: [http://doi:10.1016/S0036-9748\(88\)80333-8](https://doi.org/10.1016/S0036-9748(88)80333-8)
128. В. С. Иванова, А. А. Оксогоев, “О связи стадийности процессов пластической деформации с фрактальной структурой, отвечающей смене масштабного уровня деформации”, Физическая мезомеханика, Т. 9, № 6, с.17-27, 2016
129. Волков И. А. Уравнение состояния вязко-уруго-пластических сред с повреждениями [Текст] / И. А. Волков, Ю. Г. Коротких. –М.: Физматлит, 2008. – 424 с. –URL: <https://books.google.nl/books?isbn=5457967328>
130. Голубев В.С., О механизмах удаления расплава при газолазерной резке материалов.
131. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн.5. Лазерная сварка металлов: Учеб. пособие для вузов /; Под ред. А.Г.Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1988 – 207 с.: ил.
132. Гринберг А.А., Мехтиев Р.Р., Рывкин С.М. и др., Поглощение лазерного излучения и разрушение в полупроводниках. – «Физика твердого тела», 1967, 9, №5. – С. 1390-1397.
133. Днепренко В. Н. Исследование природы формирования дислокационной структуры в различных компонентах текстуры прокатанной меди / В. Н. Днепренко, Л. Н. Ларионов, Е. Н. Стоянова // Металлофизика и новейшие технологии. – 1982. – Т.4, вып. 5. –С. 58-66. –URL: <https://mfint.imp.kiev.ua/ru/toc/v04/i05.html>
134. Изотов А.Д. Фракталы: делимость вещества как степень свободы в материаловедении: монография / А.Д. Изотов, Ф.И. Маврикиди. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – С. 42-44.

135. Использование мультифрактального анализа для оценки свойств конструкционных сталей О. А. Штофель, М. Д. Рабкина – Universum: технические науки, 2016.
136. Карпов В.Г., Субашиев А.В., Что такое фракталы? ЛПИ, 1989.
137. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. –М: Наука, 1974. – 312 с. –URL:<https://lib-bkm.ru/13776>
138. Кінетика розсіяного руйнування металевих конструкційних матеріалів при пружно-пластичному деформуванні / М. І. Бобир, А. П. Грабовський, О. П. Халімон, О. В. Тимошенко, О. М. Масло // Проблеми прочності. – 2007. – № 3. – С. 23-34. –URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/48064/02-Bobir.pdf?sequence=1>
139. Л.М.Лобанов, Л.И. Миходуй, В.Г. Гордонный "Состояние и перспективы применения в сварных конструкциях высокопрочных сталей с улучшенной свариваемостью", Автоматическая сварка, № 12, 1998.
140. Лыков А.В. Теория теплопроводности: Учеб. пособие для вузов. М.: “Высшая школа”, 1967. - 599 с
141. М. А. Смирнов, К. Ю. Окишев, Х. М. Ибрагимов, Ю. Д. Корягин, Материаловедение: Учебное пособие. Ч. I. Челябинск, РФ: Изд. ЮУрГУ, 2005
142. Макаренко К. В. Развитие теоретических основ и технологических способов рационального структурирования графитизированных чугунов: Автореф. дис. ... д-р. техн. наук. - Нижний Новгород, 2014. – 16 с.
143. Макаренко К.В., Тотай А.В., Тихомиров В.П. Использование фрактального формализма для описания структур конструкционных материалов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. № 4(32) – С. 59 / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: [http://www.tubryansk.ru/doc/vestnik/4\\_2011/mak\\_tot\\_tih.doc](http://www.tubryansk.ru/doc/vestnik/4_2011/mak_tot_tih.doc). (дата обращения: 28.09.2016).

144. Макро- и микроанализ металлов и сплавов: учебно-методическое пособие к лабораторным работам по дисциплине «Материаловедение» / Л. Г. Петрова [и др.]. – М.: МАДИ, 2018. – 56 с.
145. Маркова Е.В. Совершенствование термической обработки прецизионных деталей на основе закономерностей структурообразования стали 09Х16Н4БЛ: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2013. – 23 с.
146. Механические свойства конструкционных материалов при низких температурах: Сб. науч. трудов: Пер. с англ. под ред. Фридляндера И. И., Москва, РФ: Металлургия, 1983
147. Протоєрейський О. С, Запорожець О. І. Охорона праці в галузі: Навч. посіб. — К.: Книжкове вид-во НАУ, 2005. — 268 с.
148. Березуцького В.В. За ред. Проф. Основи охорони праці: Підручник / — Х.: Факт, 2005. — 480 с.
149. Ткачук К. Н., Халімовський М. О., Зацарний В. В. та ін. Основи охорони праці: Підручник. — 2-ге вид., допов. і перероб. — К.: Основа, 2006. — 444 с.
150. Русаловський А. В. Правові та організаційні питання охорони праці: Навч. посіб. — 4-те вид., допов. і перероб. — К.: Університет «Україна», 2009. — 295 с.
151. Гогіташвілі Г. Г., Карчевські Є.Т., Лапін В. М. Управління охороною праці та ризиком за міжнародними стандартами: Навч. посіб. — К.: Знання, 2007. — 367 с.
152. ДНАОП 0.00-1.07-94. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (с изменениями и дополнениями). – URL: <http://3umf.com/doc/5373/>
153. ГОСТ 4543-71. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия (с изменениями N 1, 2, 3, 4, 5). <http://docs.cntd.ru/document/gost-4543-71>

154. ДСТУ EN 10045-1:2006. Матеріали металеві. Випробування на ударний вигин за Шарпі. Частина 1. Метод випробування. Київ: Держспоживстандарт України, 2008
155. Аникина, В. И. Фрактография в материаловедении [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В. И. Аникина, А. А. Ковалева. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 144 с. - ISBN 978-5-7638-3114-6.
156. Olga Shtopfel, Marjana Rabkina ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДО ВИВЧЕННЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ. Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування 58 (2),2019 – с.28-33.
157. ГОСТ 1778-70 Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. Электронный ресурс <http://gostrf.com/normadata/1/4294835/4294835064.pdf>
158. ГОСТ 5639-82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна (с Изменением N 1). Электронный ресурс <http://docs.cntd.ru/document/1200005473>

## ДОДАТОК 1

---

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Drawing;
using System.IO;

/**
 * @see https://habrahabr.ru/post/208368/
 *
 * compile on linux (mono compiler):
 * > gmcs /reference:System.Drawing.dll olya_calc.cs
 *
 * Usage:
 * > olya_calc.exe <outputPath> <imagePath>
 */

namespace Calc
{
    class Calc
    {
        public static void Main (string[] args)
        {
            Console.WriteLine();
            if (args.Length != 2) {
                Console.WriteLine("Directory and image path are required: calc  
<outputPath> <imagePath>");
                return;
            }
        }
    }
}
```

---

```

    string outputPath = args[0];
    string imagePath = args[1];
    if (!Directory.Exists(outputPath)) {
        Console.WriteLine("Please create directory: " + outputPath);
        return;
    }
    if (!File.Exists(imagePath)) {
        Console.WriteLine("Image file does not exists. Check: " + outputPath);
        return;
    }

    Console.WriteLine("outputPath: " + outputPath);
    Console.WriteLine("imagePath: " + imagePath);

    Image image = Image.FromFile(imagePath);
    Bitmap bwContour = new Bitmap(image);

    Console.WriteLine();
    Console.WriteLine("Processing...");
    IDictionary<double, double> baList = BowCountingDimension(bwContour,
5, 100, 1, outputPath);
    double[] y = new double[baList.Count];
    double[] x = new double[baList.Count];
    int c = 0;
    foreach (double key in baList.Keys) {
        y[c] = baList[key];
        x[c] = key;
        c++;
    }
    double[] theta = NormalEquations2d(y, x);

    Console.WriteLine();
    if (Double.IsNaN(theta[0])) {
        Console.WriteLine("Error: There was an error calculating theta. Theta is
not a number.");
    } else {
        Console.WriteLine("Done: Theta is: " + theta[0].ToString());
    }
    Console.WriteLine();
}

public static double[] NormalEquations2d(double[] y, double[] x)
{
    //  $x^t * x$ 

```

---

```

double[,] xtx = new double[2, 2];

for (int i = 0; i < x.Length; i++) {
    xtx[0, 1] += x[i];
    xtx[0, 0] += x[i] * x[i];
}
xtx[1, 0] = xtx[0, 1];
xtx[1, 1] = x.Length;

// inverse
double[,] xtxInv = new double[2, 2];
double d = 1/(xtx[0, 0]*xtx[1, 1] - xtx[1, 0]*xtx[0, 1]);
xtxInv[0, 0] = xtx[1, 1]*d;
xtxInv[0, 1] = -xtx[0, 1]*d;
xtxInv[1, 0] = -xtx[1, 0]*d; xtxInv[1, 1] = xtx[0, 0]*d;

// times x^t
double[,] xtxInvxt = new double[2, x.Length];
for (int i = 0; i < 2; i++) {
    for (int j = 0; j < x.Length; j++) {
        xtxInvxt[i, j] = xtxInv[i, 0]*x[j] + xtxInv[i, 1];
    }
}

// times y
double[] theta = new double[2];
for (int i = 0; i < 2; i++) {
    for (int j = 0; j < x.Length; j++) {
        theta[i] += xtxInvxt[i, j]*y[j];
    }
}

return theta;
}

/// <summary>
/// Box-counting algorithm
/// </summary>
/// <param name="bw">black-white bitmap</param>
/// <param name="startSize">initial size of square of grid</param>
/// <param name="finishSize">final size of square of grid</param>
/// <param name="step">step of changing of the grid</param>
/// <returns>baList.Add(Math.Log(1d/b), Math.Log(a)), where b is swuare
length size, a is the number of intersection of image with grid squares</returns>

```



---

```

public static IDictionary<double, double> BowCountingDimension(
    Bitmap bw,
    int startSize,
    int finishSize,
    int step = 1,
    string dataPath = ""
) {
    if (dataPath.Length > 0) {
        if (dataPath[dataPath.Length - 1] != '\\') {
            dataPath += '\\';
        }

        if (!Directory.Exists(dataPath)) {
            throw new Exception(dataPath + " does not exists.");
        }
    }

    //length size - number of boxes
    IDictionary<double, double> baList = new Dictionary<double, double>();
    for (int b = startSize; b <= finishSize; b += step) {
        int hCount = bw.Height/b;
        int wCount = bw.Width/b;
        bool[,] filledBoxes = new bool[wCount + (bw.Width > wCount*b ? 1 : 0),
hCount + (bw.Height > hCount*b ? 1 : 0)];
        for (int x = 0; x < bw.Width; x++) {
            for (int y = 0; y < bw.Height; y++) {
                if (bw.IsBlackPixel(x, y)) {
                    int xBox = x/b;
                    int yBox = y/b;
                    filledBoxes[xBox, yBox] = true;
                }
            }
        }
        int a = 0;
        for (int i = 0; i < filledBoxes.GetLength(0); i++) {
            for (int j = 0; j < filledBoxes.GetLength(1); j++) {
                if (filledBoxes[i, j]) {
                    a++;
                }
            }
        }
        baList.Add(Math.Log(1d/b), Math.Log(a));
        if (dataPath.Length > 0) {
            Bitmap bmp = new Bitmap(bw);

```

---

```

        for (int i = 0; i < filledBoxes.GetLength(0); i++) {
            bmp.DrawLine(i * b, 0, i * b, bmp.Height, Color.HotPink);
        }
        for (int j = 0; j < filledBoxes.GetLength(1); j++) {
            bmp.DrawLine(0, j * b, bmp.Width, j * b, Color.HotPink);
        }
        for (int i = 0; i < filledBoxes.GetLength(0); i++) {
            for (int j = 0; j < filledBoxes.GetLength(1); j++) {
                if (filledBoxes[i, j]) {
                    bmp.FillRectangle(i * b, j * b, b, b, Color.Red, 2);
                }
            }
        }
        bmp.Save(dataPath + b + ".png");
    }
    // Console.WriteLine("BoxCounting: b is " + b + " of " + finishSize);
}
if (dataPath.Length > 0) {
    using (StreamWriter sw = new StreamWriter(dataPath + "ba.csv")) {
        sw.WriteLine("NumberOfBoxes,LengthOfSideInv");
        foreach (double bInv in baList.Keys) {
            sw.WriteLine(baList[bInv] + "," + bInv);
        }
        sw.Close();
    }
}
return baList;
}
}

```

```

public static class BitmapExtensions {
    public static bool IsBlackPixel(this Bitmap bm, int x, int y) {
        Color color = bm.GetPixel(x, y);
        float brightness = color.GetBrightness();

        if (brightness != 0.0 && brightness != 1.0) {
            throw new Exception("Image must be black and white (not color or grayscale)");
        }

        return color.GetBrightness() == 0;
    }
}

```

---

```
    public static void DrawLine(this Bitmap bmp, int x1, int y1, int x2, int y2, Color
color) {
        using (Graphics g = Graphics.FromImage(bmp))
        {
            g.DrawLine(new Pen(color), x1, y1, x2, y2);
        }
    }
```

```
    public static void FillRectangle(this Bitmap bmp, int x, int y, int width, int
height, Color color, int sidePadding) {
        int padding = sidePadding / 2;

        using (Graphics g = Graphics.FromImage(bmp))
        {
            g.FillRectangle(
                new SolidBrush(Color.FromArgb(128, color.R, color.G, color.B)),
                x + padding,
                y + padding,
                width - padding,
                height - padding
            );
        }
    }
}
```